INVESTIGACION y CIENCIA

ANCIANOS ENTRE LOS ANCIANOS

ENFERMEDADES NEURODEGENERATIVAS

NACIMIENTO Y MUERTE DE LAS NOVAS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



ASI ERA LA TIERRA ANTES DE PANGEA

MARZO 1995
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Marzo de 1995 Número 222



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *¿Son perdurables los documentos digitales?*; *Ley y orden en el universo*; *Juegos matemáticos* y *Ensayo*; Esteban Santiago: *El prion en la patología*; Ricardo Varela: *La Tierra antes de Pangea*; Ignacio Fita y Pablo Santos: *Máquinas biomoleculares elásticas*; Mónica E. Murphy: *Nacimiento y muerte de la nova V1974 Cygni*; Ana M.ª Rubio: *Ancianos entre los ancianos;* J. Vilardell: *Hace...*

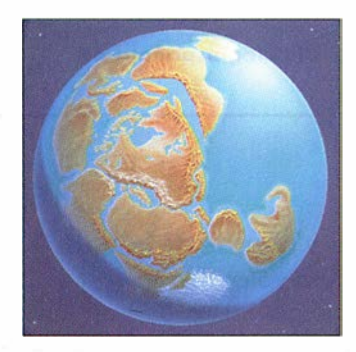
Ciencia y sociedad:

Joandomènec Ros y Mónica E. Murphy

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Tomo Narashima

Página	Fuente
9	Jeff Rothenberg
10	Jana Brenning
12-13	Laurie Grace
14-15	Dimitry Schidlovsky (*gráfico*), David Jackson (*fotografía*)
17	Fred E. Cohen (*izquierda*), Dimitry Schidlovsky (*derecha*)
18	Dimitry Schidlovsky
19	Stephen J. Dearmond
20-21	Dimitry Schidlovsky (*dibujos*) y Stephen J. Dearmond (*microfotografías*)
22	Ian Worpole
23	Galen Rowell *Mountain Light*
24	Ian W. D. Dalziel, Margaret Reese (*superior derecha*)
25	Ian Worpole
26-27	Jana Brenning
43	Ann States *SABA*
44	Jared Schneidman/JSD (*inferior izquierda*)
44-45	Andreas Windemuth
46	Jared Schneidman/JSD
47	Cortesía de Dan W. Urry
48-56	Fernando Casares y Ernesto Sánchez-Herrero
59	Kathy Konkle
60-61	George Retseck (*arriba*), George H. Krauter y Kathy Konkle (*abajo*)
62	Lisa Burnett
63	Harold Edgerton
65-71	Documentos Pour la Science
74-75	Anne E. Perls (*inferior izquierda*), John R. McCutchen, *San Diego Union-Tribune*
76	Georges Gobet, Agencia *France Presse* (*arriba*), Lisa Burnett (*abajo*)
77	Lisa Burnett
78	Erik Leigh Simmons (*arriba*), Lisa Burnett (*abajo*)
79	Erik Leigh Simmons (*izquierda*), Victoria Enger, *MSU New Service* (*derecha*)
86	Dianne Gaspas ETTL
87-88	Johnny Johnson



La imagen de la portada representa la Tierra tal como era 750 millones de años atrás, cuando los continentes se congregaron en uno solo, Rodinia. Excepto en ciertas partes de Africa y América del Sur, no había océanos interpuestos. Se muestran, según la costumbre, para orientar al observador, los Grandes Lagos, la bahía de Hudson y la bahía de Baffin. América del Norte viajó alrededor de los otros escudos continentales hasta volver a reunirse para formar Pangea (véase "La Tierra antes de Pangea", por Ian W. D. Dalziel, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Pan de mejor calidad en menos tiempo, según se expone en la presentación de una nueva máquina panificadora en la que se emplean rayos infrarrojos en vez del calor de un horno. Como la radiación infrarroja es más penetrante que el calor generado en los hornos ordinarios, la cocción comienza en el centro de las barras casi tan rápidamente como en la superficie y el proceso continúa de un modo más uniforme por toda la masa. Otra característica notable del proceso es que resulta una corteza más suave.»

«La tecnología para la exploración de la atmósfera superior ha progresado considerablemente gracias a un dispositivo conocido como "Radioemisor Meteorológico". El aparato contiene tres "detectores" meteorológicos sensibles a las variaciones de temperatura, humedad y presión. Un sencillo mecanismo de despertador mantiene rotando continuamente una espira de grabación y un dispositivo radiotransmisor envía una señal a un aparato de grabación en tierra. Todo el instrumental es alzado al vuelo mediante un globo de látex de un metro y medio hasta un límite de ascensión medio de quince mil a dieciséis mil metros.»

«Todo el mundo sabe que en el horizonte se percibe un enorme auge en la construcción. ¿Se va a conformar cualquiera con una casa que sea casi igual a la de sus vecinos hasta donde la vista alcance? No parece muy necesario que registremos aquí la respuesta negativa.»

«Según Alfred Africano, expresidente de la Sociedad Americana de Cohetes, "no es probable que en esta guerra se empleen cohetes transatlánticos, pero en un futuro no muy lejano los vuelos en avión cohete entre Londres y París serán una realidad. Si bien ya son posibles las aplicaciones militares de los motores de propulsión a chorro, la cuestión aún está en su infancia en lo que se refiere a las aplicaciones comerciales de esta rama de la técnica".»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Lord Rayleigh asombró al mundo anunciando el descubrimiento de un nuevo componente de la atmósfera. El nuevo gas recibe el nombre de "argón" y, por lo que hasta ahora se sabe, no está en absoluto relacionado con ninguna otra sustancia química natural.»

«En química es un hecho perfectamente sabido que el fósforo rojo (uno de los componentes de los frotadores de las cajas de cerillas de seguridad) se combina explosivamente con el clorato potásico; aunque no se ha previsto la posibilidad de que tal reacción tenga lugar en el bolsillo de una persona. Sin embargo, varios periódicos han informado hace poco que la presencia simultánea de una caja de cerillas y una caja de pastillas de clorato potásico en un mismo bolsillo provocaron un serie de pequeñas explosiones que prendieron fuego a las ropas del infortunado portador, produciéndole quemaduras graves en las piernas.»

«M. De Chateaubourg describe un nuevo tratamiento para la tos ferina consistente en inyecciones subcutáneas de un preparado de una solución al dos por ciento de guayacol y eucaliptol en aceite esterilizado. Tras la tercera inyección, los accesos de tos disminuyen apreciablemente, retorna el apetito y, a la vez que los vómitos cesan rápidamente y el estado general empieza a reflejar los efectos del tratamiento, desaparece la tos ferina. El autor dio cuenta de cinco casos.»

«M. Dieulafoy, quien con su esposa exploró las ruinas de Susa, ha sido elegido para la Academie Française des Inscripcions. Mme. Dieulafoy no sólo recibió la Legión de Honor por su participación en los trabajos, sino también el derecho a vestir de hombre en público.»

«Entre las pasiones más extraordinarias de comer cosas raras hay que contar la que muestran algunos pueblos a ingerir tierra o arcilla. Parece tratarse de una práctica que otrora imperaba en todo el mundo. En ciertos lugares, la costumbre degeneró en ritos, mientras que en otros la ingestión de tan extraños alimentos sigue prevaleciendo como algo vitalmente necesario para los adictos a ella.»

«En nuestra ilustración de la Escuela Normal Metropolitana de Nueva York se observará que el laboratorio químico se ve ocupado tanto por muchachos como por adultos. Los muchachos y también las muchachas son alumnos de la Escuela Horace Mann, que realizan sus prácticas de química, mientras que entremezclados con ellos, sea ayudando, enseñándoles u observando, se ven los alumnos adultos de la Escuela Normal. En ésta, los alumnos no sólo reciben enseñanzas de química o física, sino que además estudian los más avanzados métodos de enseñanza de esas ciencias en las aulas y los laboratorios.»



El laboratorio químico de la Escuela Normal de Nueva York

¿Son perdurables los documentos digitales?

La sustitución del papel por el soporte digital está creando una profunda revolución en el mundo del registro de documentos. Pero los archivos digitales pueden perderse, si no se actúa de inmediato

Jeff Rothenberg

Año de 2045. Mis nietos (que no han nacido aún) están explorando el desván de mi casa (que no he comprado todavía). Descubren una carta fechada en 1995 y un disco CD-ROM. La carta dice que el disco contiene un documento en el que se da la clave para heredar mi fortuna (que no he ganado aún). Mis nietos sienten viva curiosidad, pero jamás han visto un disco compacto, salvo en viejas películas. Aun cuando localizaran un lector de discos adecuado, ¿cómo lograrían hacer funcionar los programas necesarios para la interpretación del contenido? ¿Cómo podrían leer mi anticuado documento digital?

La fabulilla pone sobre la mesa ciertos problemas que entrañan los documentos digitales. De no ser por la carta explicativa, mis nietos no tendrían motivos para pensar que mereciera la pena descifrar el disco. La carta posee la envidiable propiedad de ser legible sin máquinas, instrumentos o conocimientos especiales, aparte del propio idioma. Debido a que la información digital puede copiarse y recopiarse a la perfección, se alaba a menudo su incuestionada longevidad. Pero la verdad es otra. Dado el carácter mudable de programas y circuitería, dentro de 50 años lo único directamente inteligible será la carta.

El progreso de la técnica asociada a la información está revolucionando nuestra concepción sobre el archivo de documentos. Y lo hace de forma tan arrolladora como operó la introducción de la imprenta, por no decir la propia escritura. La presente generación de registros electrónicos posee una importancia histórica excepcional. Sin embargo, estos documentos son mucho más frágiles que el papel, quedando en peligro por ello toda la crónica de nuestro tiempo.

JEFF ROTHENBERG, hoy en la empresa RAND, ha trabajado en teoría de modelización y en la aplicación de la informática a la investigación humanística.

Mi preocupación no carece de fundamento. Han sido varias las veces que ha podido producirse una catástrofe. Un informe de 1990 de la Cámara de Representantes de los EE.UU. refiere cómo se salvó por los pelos el censo de 1960. Los datos científicos corren riesgos parecidos, al ir envejeciendo y perderse en el olvido los registros irreemplazables de numerosos experimentos realizados por la NASA y otras organizaciones.

De aquí a la eternidad

La información digital, en teoría invulnerable a los embates del tiempo, se almacena en medios materiales que distan mucho de ser eternos. Si el disco CD de mi desván fuese magnético en lugar de óptico, probablemente resultaría vano el empeño en leerlo. Los campos magnéticos parásitos, la oxidación y la degradación de los materiales borran esos discos. El contenido de casi todos los soportes digitales se esfuma mucho antes que las palabras escritas en papel de calidad. Es frecuente que resulten inutilizables mucho antes, al sustituirlos por formatos nuevos e incompatibles. ¿Quién recuerda los discos flexibles de ocho pulgadas?

Empero, ni la fragilidad física de los medios digitales, ni su suicida tendencia a quedar anticuados constituye el peor de los problemas de mis nietos. Mis descendientes no sólo tendrán que extraer el contenido del disco, sino interpretarlo correctamente. Para comprender la dificultad en que se encuentran resulta necesario examinar la naturaleza del almacenamiento digital de información, que puede realizarse sobre cualquier medio capaz de representar los dígitos binarios ("bits") 0 y 1. Se denomina "corriente binaria" a cualquier sucesión de bits deliberadamente construida, sin espacios intermedios, puntuación o formato.

La recuperación de una corriente binaria requiere dispositivos físicos y circuitos especiales aptos para leer la representación física de los bits en el medio donde están registrados; por ejemplo, un lector de discos. Para acceder al dispositivo desde un determinado ordenador se necesita también un programa controlador ("driver"). Y después de recuperado el flujo binario, se requiere interpretarlo. Dicha tarea no es nada fácil, porque una corriente binaria puede representar casi lo que se quiera, desde una sucesión de números enteros hasta la disposición de los puntos en una imagen de estilo puntillista.

Además, la interpretación de una corriente binaria pasa por la comprensión de su estructura implícita, que no cabe representar explícitamente en la corriente. Una corriente binaria que represente una sucesión de caracteres alfabéticos puede consistir en tramos de longitud fija ("bytes"), cada uno de los cuales es representación codificada de un solo carácter. Por ejemplo, en uno de los sistemas en uso, los ocho bits 01110001 denotan la letra q. Para extraer bytes de la corriente binaria y descomponerla "morfológicamente" en sus constituyentes, hace falta conocer la longitud de byte.

Patra aportar esa longitud de byte podemos codificar una "clave" al principio de la corriente binaria. Pero también esta clave ha de estar representada por un byte de cierta longitud. Por consiguiente, un lector necesita otra clave para comprender la primera. La solución de este problema recursivo recibe en la jerga informá-

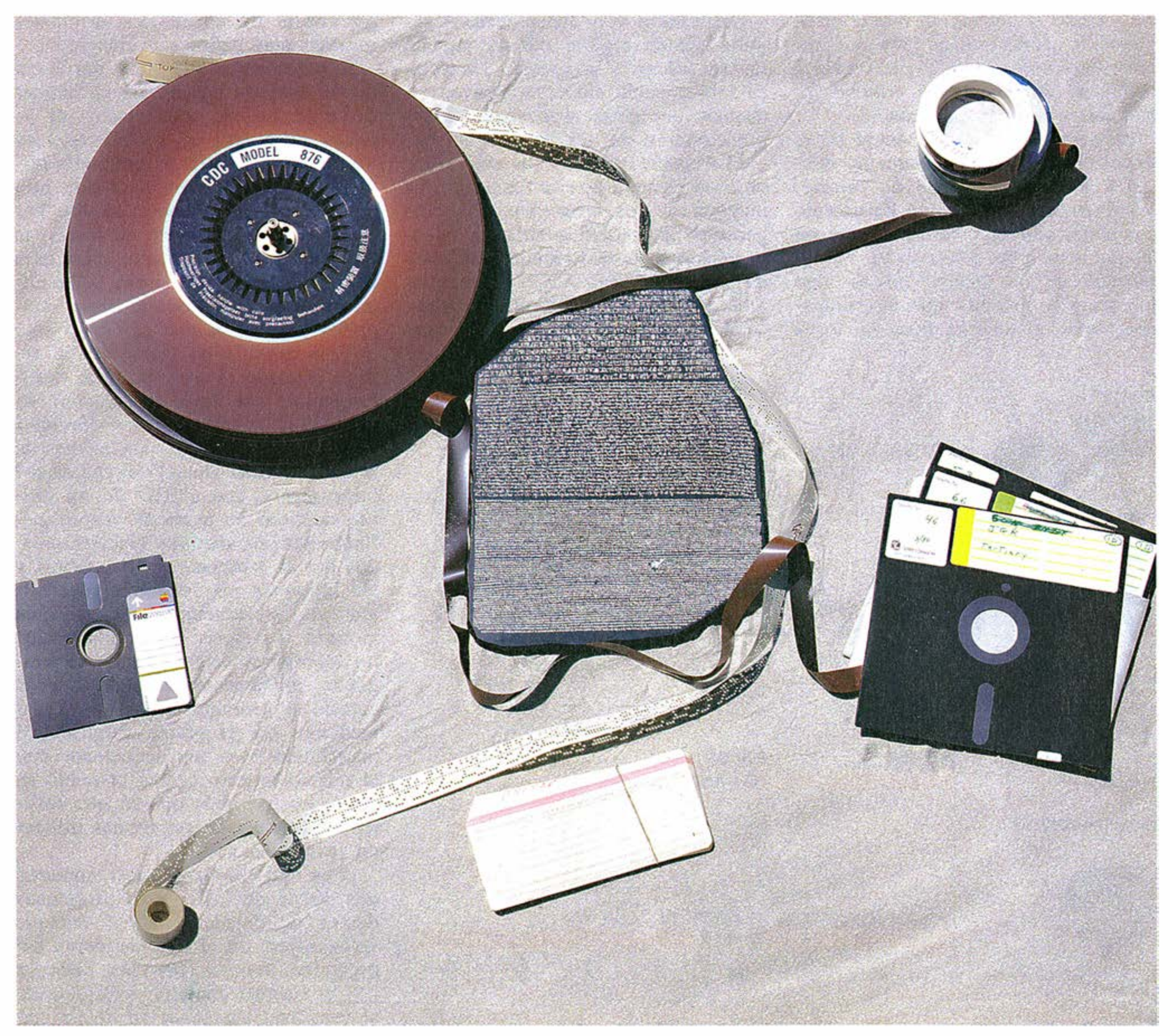
tica el nombre de "bootstrap" (que podríamos traducir aquí por "autolanzamiento"). En este caso, el propio sistema de lanzamiento ha de suministrar cierto contexto, legible por las personas, que explique la forma de interpretar el medio de almacenamiento digital. En la fábula familiar, cumple ese papel la carta que acompaña al disco.

Descompuesta correctamente la corriente binaria, hay que afrontar otro problema recursivo. En un código cualquiera, un byte puede representar, por ejemplo, un número o un carácter alfabético. Para interpretar tales bytes necesitamos conocer el sistema de codificación. Pero si tratamos de averiguar dicho sistema insertando un identificador de código en la propia serie binaria, necesitaremos otro identificador de código para interpretar al primero. Lo mismo que antes, un contexto legible por personas tiene que servir para el lanzamiento.

Hay otro aspecto más problemático: las corrientes binarias pueden contener información compleja, rica en referencias cruzadas. La corriente suele almacenarse en forma de un fichero o colección de bits que contienen elementos lógicamente relacionados, pero físicamente separados. Dichos elementos se concatenan mediante referencias internas, consistentes en señalizadores de otros elementos o en patrones de concordancia. (Los documentos impresos exhiben sistemas parecidos; en ellos, la numeración de las páginas sirve de señalizador.)

Interpretación de una corriente binaria

Imaginemos que mis nietos consiguen leer la corriente de bits del CD-ROM. Tendrán que afrontar entonces la verdadera dificultad: interpretar la información inmersa en la corriente binaria. En la mayoría de los archivos, la información que contienen tiene sólo significado para las aplicaciones con que se crearon. Los ficheros de tratamiento de textos incluyen instrucciones de formato, que describen la tipografía, organización del escrito y paginación (títulos, ca-



1. LOS MEDIOS DIGITALES se quedan anticuados rápidamente. Los de la fotografía no han logrado mantenerse legibles durante la centésima parte del tiempo que lo ha sido la Piedra Rosetta. El texto en griego clásico grabado en la piedra, descubierta en 1799 por una compañía de zapadores del ejército francés, permitió entender las escrituras jeroglífica y demótica de los antiguos egipcios. Además de ser legible al cabo de 22 siglos, la Piedra Rosetta (la de la fotografía es una copia) debe su preservación al impacto visual de su contenido, atributo del que carecen los medios digitales.

pítulos, etc.). Los archivos correspondientes a hojas de cálculo llevan incorporadas las fórmulas con que se relacionan sus casillas. Los archivos de los "hipermedios" portan información que identifica y concatena textos, gráficos, sonido y datos temporales.

Por conveniencia, denominaremos codificación del archivo de un documento a tal información subyacente, incluidos todos los restantes aspectos de la representación de una corriente binaria, entre ellos, longitud de byte, código de caracteres y estructura. Tales archivos son, esencialmente, programas: instrucciones y datos que sólo pueden interpretarlos soportes lógicos adecuados. Un archivo no constituye por derecho propio un documento: es, simplemente, la descripción de un documento, el cual adquiere existencia cuando el archivo lo interpreta el programa que lo produjo. Sin este programa (o un soporte lógico equivalente), el documento es críptico rehén de su propia codificación.

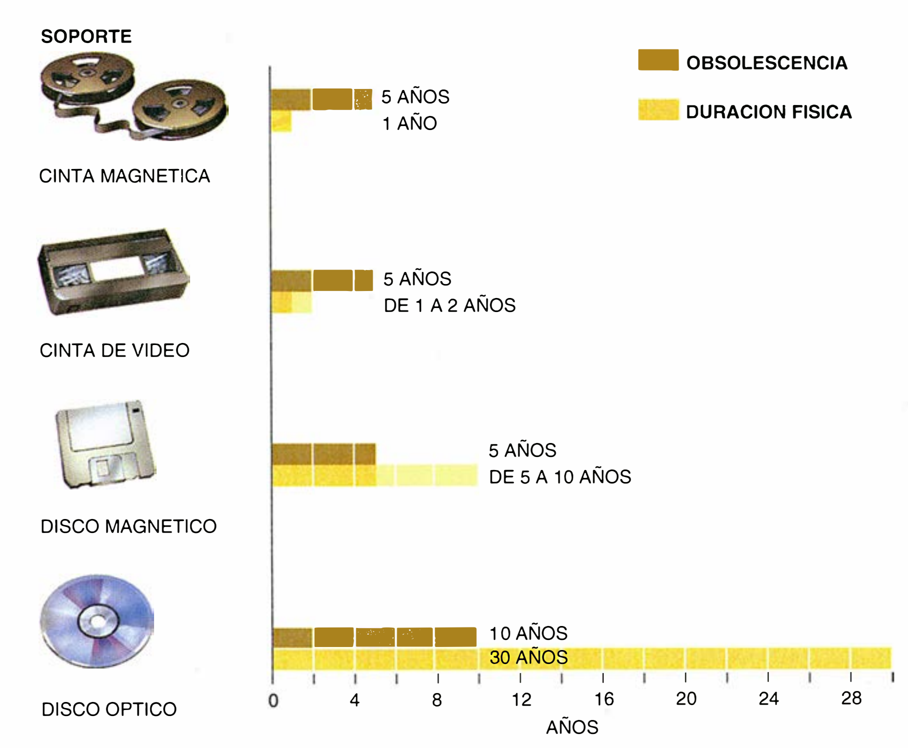
La decodificación por tanteo no es imposible cuando el documento consiste en mera secuencia de caracteres. Pero si se trata de un documento complejo, resulta inverosímil que un ataque a lo bruto tenga éxito. El significado de un archivo no es algo inherente a los bits que lo componen, como el de esta frase no lo es a las palabras que la forman. Para comprender un documento cualquiera, hemos de entender qué significa su contexto en el lenguaje del lector al que está dirigido. Desdichadamente, el destinatario del archivo de un documento es un programa. Resulta imposible la lectura de documentos como las presentaciones multimediáticas sin disponer de los programas adecuados; a diferencia de las palabras impresas, no basta con "acercarlas a la luz."

¿Es necesario utilizar el programa específico con el que fue creado un documento? En ciertos casos, soportes lógicos similares pueden lograr la decodificación, al menos parcial, de un archivo. Pero no hemos de caer en la ingenuidad de pensar que la codificación de un documento cualquiera —por natural que nos parezca— seguirá siendo legible durante mucho tiempo por otros programas. La técnica está creando sin cesar nuevos esquemas, que dejan abandonados a sus predecesores, en vez de subsumirlos.

El tratamiento de textos nos ofrece un buen ejemplo de este fenómeno. La mayoría de los programas al efecto permiten al usuario guardar su trabajo en forma de texto simple, utilizando el actual código ASCII ("American Standard Code for Information Interchange", código estándar americano para intercambio de información), que es un código de siete bits. Tales textos serían relativamente fáciles de decodificar en el futuro si el ASCII de siete bits siguiera siendo el estándar preferido para textos. Pero ASCII no es el único código de uso generalizado para texto y, por otra parte, existen propuestas de ampliarlo a un código de 16 bits (para dar cabida a alfabetos distintos del inglés). Los lectores del futuro podrían verse incapaces, por tanto, de adivinar el estándar de texto correcto. Para complicar las cosas, los escritores rara vez guardan su trabajo en forma de texto puro. Como Avra Michelson y el autor hicieron notar en 1992, los escritores acostumbran dar formato a su trabajo en el inicio del proceso de escritura y añaden figuras y notas al pie con el fin de que sus originales resulten más legibles y completos.

Si entendemos que "leer" un documento consiste meramente en extraer su contenido, sin conservación de su forma primitiva, es posible que no necesitemos recurrir al programa original. Pero el contenido puede perderse de muchas maneras sutiles. Por ejemplo, en tratamiento de textos, la traducción de los formatos provoca a menudo el desplazamiento o la eliminación de encabezamientos, epígrafes y notas al pie. ¿Se trata sólo de una pérdida de estructura, o resulta afectado el contenido? Si transformamos una hoja de cálculo en una tabla, eliminando las fórmulas que relacionan entre sí las casillas de la tabla, ¿queda alterado el contenido? Supongamos que el CD de mi desván contiene un mapa del tesoro, definido por los motivos visuales creados por el espaciado entre palabras y las líneas de mi versión digital original de este artículo. Dado que esos motivos y siluetas son artefactos de los algoritmos de formato de mi programa, únicamente serán apreciables cuando se examine la versión digital mediante mi programa original. Si necesitamos ver un documento con el mismo aspecto que lo concibió su autor, no hay más opción que recurrir al paquete de programas utilizado para generarlo.

¿Con qué probabilidades contarán mis nietos de hallar esos programas dentro de cincuenta años? Aunque yo incluyera en el CD una copia del programa, todavía tendrían que dar con el sistema operativo que permite al programa funcionar en determinado ordenador. Almacenar en el disco una copia del sistema operativo podría servirles de ayuda, pero el equipo informático necesario para hacerlo funcionar habría quedado fuera de



2. ESPERANZA DE VIDA de diversos medios de almacenamiento digital de uso común, estimada por lo bajo, para garantizar que no se pierda ningún dato. (Las cintas analógicas, como las utilizadas para registros de audio, pueden reproducirse durante muchos años, porque las señales grabadas, mucho más robustas, tardan más en degradarse.) El tiempo estimado para el envejecimiento de cada medio se refiere a un formato de registro particular.

servicio desde hacía mucho tiempo. ¿Qué clase de “Piedra Rosetta” digital podría dejarles yo, que les proporcionase la clave para comprender el contenido del disco?

Delas Indias Occidentales. 10

El palo que llaman Guayacan. La China. La çarçaparrilla.

Y porque pareſce que la China viene de Portugal, y que los Portugueſes la traen de ſus Indias Orientales, y no de las nueſtras: dire lo que enello ay adelante, quando della hablaremos.

Pues comencemos por el Guayacan, como de remedio primero venido delas Indias, y como primero el mejor de todos, como lo ha moſtrado la experiencia, y vſo del en tantos años.

DEL GVAYACAN Y
Palo ſanto.

EL Guayacan, que llaman los nueſtros Palo delas Indias, ſe deſcubrio luego que ſe hallaron las primeras Indias, que fue la Isla de ſanto Domingo, do ay grande cantidad dello. Dio noticia del vn Indio a ſu amo, eneſta manera. Como vn Eſpañol padecieſſe grandes dolores de Bubas, que vna India ſe las auia pegado, el Indio que era delos Medicos de aquella tierra, le dio el agua del Guayacan, con que no ſolo ſe le quitarõ los dolores que padeſcia, pero ſano muy bien del mal: con lo qual otros muchos Eſpañoles, que eſtauan inficionados del miſmo mal, fueron ſanos: lo qual ſe comunico luego por los que de alli vinieron aqui a Seuilla, y de aqui ſe diuulgo por toda Eſpaña, y della por todo el mundo, porque ya la infection eſtaua deſeminada por todo el: y cierto para eſte mal, es el mejor y mas alto remedio de quantos haſta oy ſe han hallado, y que con mas certinidad y mas firmeza ſana y cura la tal enfermedad. Porque ſi ſon bien curados, y ſe da eſta agua como ſe ha de dar, es cierto que ſanan perfectiſsimamente, ſin tornar a recaer, ſaluo ſi el enfermo no torna a rebolcarſe enel miſmo cieno, do tomo las primeras.

Palo de las indias

Hiſtoria.

Nota.

C 2 Quiſo

3. FRAGMENTO SOBRE EL GUAYACAN de *La Historia Medicinal de las cosas que se traen de nuestras Indias Occidentales, que sirven en Medicina,* **de Nicolás Monardes, en su edición de 1580. Sirve de ejemplo para indicar la longevidad de los libros impresos. El texto es perfectamente legible cuatro siglos después.**

Migraciones de bits

Para impedir que se pierdan los documentos digitales, hemos de empezar preservando sus corrientes binarias. Lo cual significa copiar los bits sobre soportes de nuevos tipos, y así garantizar su accesibilidad. El método se asemeja al de la conservación de textos, que es preciso transcribir periódicamente. Ambas actividades exigen un esfuerzo incesante; el acceso futuro se funda en una cadena ininterrumpida y frecuente de migraciones, que impida que el soporte se vuelva físicamente ilegible o anticuado antes de copiarse. Una simple ruptura de esta cadena torna inaccesible la información digital, salvo a costa de esfuerzos heroicos. Dada la actual falta de permanencia de los soportes y la velocidad con que evolucionan sus formas, tal migración puede resultar necesaria cada pocos años. Estimaciones a la baja sugieren que los datos retenidos en cinta magnética digital deberían copiarse una vez al año para garantizar que no haya fugas de información. (La capacidad de reproducir cintas analógicas perdura muchos años, porque las señales registradas en ellas son mucho más robustas y su degradación, más lenta.)

Es posible que, a la larga, acabemos desarrollando medios de almacenamiento de larga duración, con lo que la migración resultaría menos apremiante. Por el momento no asoman por el horizonte medios de mayor longevidad. Sin embargo, el costo de la migración puede terminar imponiendo el desarrollo de tales productos, venciendo nuestro apetito por rendimientos superiores.

Un texto antiguo puede conservarse por traducción a un lenguaje moderno o por copia en su dialecto original. La traducción tiene a su favor que evita la obligación de conservar el conocimiento del lenguaje original; sin embargo, pocos eruditos alabarían a sus predecesores por haber tomado esta senda. Con la traducción no sólo se pierde información, sino que también resulta imposible saber qué información ha desaparecido con la pérdida del original. (En casos extremos, la traducción invalida completamente el contenido: imaginemos la traducción a ciegas de los dos idiomas de un diccionario bilingüe a un tercer idioma.) Recíprocamente, al copiar texto en su idioma original (conservación de la corriente binaria) se garantiza la integridad absoluta. Desde luego, este método da por supuesta la conservación del conocimiento del idioma original.

Los archiveros han desarrollado dos estrategias análogas para la preservación de documentos digitales. La primera consiste en traducirlos a formas normalizadas que sean independientes de cualquier equipo informático. La segunda consiste en prolongar la longevidad de los equipos informáticos y de sus soportes lógicos originales, con el fin de conservar legibles los documentos. Ambos métodos sufren de graves limitaciones.

A primera vista, se diría preferible la traducción de los documentos digitales a formas normalizadas, que siguieran siendo legibles en el futuro, eliminando así la necesidad de recurrir a programas anticuados. Los proponentes de este método ofrecen como ejemplo paradigmático la base de datos relacional, introducida en los años setenta por E. F. Codd. Dicha base de datos consiste en tablas que representan relaciones entre entidades. Una base de datos de empleados podría contener una tabla dotada de columnas para los nombres de los trabajadores y de los departamentos a que pertenecen. Una segunda tabla de la base de datos podría listar en la primera columna los nombres de los departamentos, los tamaños de los mismos en la segunda, y el nombre del jefe de departamento en la tercera. El modelo relacional define un conjunto de operaciones formales que posibilitan la combinación de las relaciones entre tablas: por ejemplo, hallar el nombre del jefe de departamento de cierto empleado.

Puesto que todos los sistemas de bases de datos relacionales llevan a la práctica este mismo modelo subyacente, cualquiera de tales bases de datos puede en principio ser traducida a una forma tabular normalizada, aceptable en cualquier otro sistema. Los archivos representados de esta manera podrían ser copiados a nuevos moldes conforme fuera siendo necesario, y el sistema normalizado garantizaría para siempre su legibilidad.

Fallos de traducción

Pero ese método adolece de dos fallos fundamentales. Ante todo, las bases de datos relacionales están menos normalizadas de lo que parece. Los sistemas comerciales de bases de datos relacionales se distinguen unos de otros por ofrecer características que amplían el modelo relacional en formas no estandarizadas. Además, las limitaciones de tales bases conducen a la adopción de nuevos modelos.

Seleccionemos los datos de un extracto de cuenta bancaria

FECHA	OPERACION	IMPORTE	SALDO
4/5/94	INGRESO EFECTIVO	$500,00	$500,00
4/26/94	TALON N.º314	$100,00	$400,00
4/27/94	INGRESO EFECTIVO	$50,00	$450,00
11/3/94	TALON N.º315	$100,00	$350,00

Eliminemos todos los espacios y signos de puntuación; traduzcamos las fechas a series de seis dígitos (mmddaa), los números de los talones a cuatro cifras; sustituyamos "ingresos" por "0000"; expresemos con 11 dígitos los importes en dólares

040594	0000	00000050000	00000050000
042694	0314	00000010000	00000040000
042794	0000	00000005000	00000045000
110394	0315	00000010000	00000035000

Al concatenar las cifras anteriores, se obtiene una corriente de dígitos decimales.

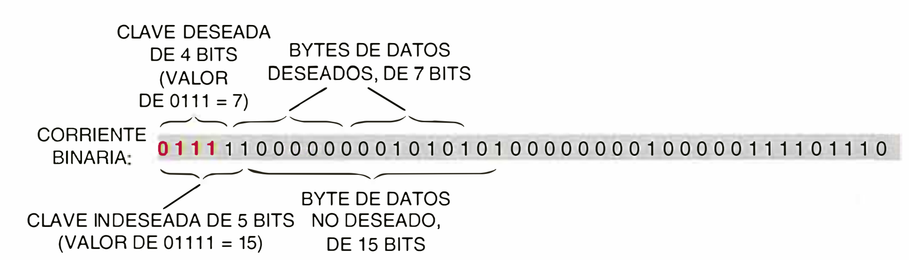
0405940000000000050000000000050000042694031400000
010000000000400000427940000000000005000000000450
00110394031500000010000000000035000

4. LA COMPRENSION de una corriente de bits exige conocer el formato utilizado para crearla. Si se escribieran unos tras otros todos los números de un extracto de cuenta bancaria, sin nada que distinguiera las referencias de las operaciones, ni las fechas, ni los importes, sería imposible entender la serie de guarismos resultante.

Las tablas de una base de datos relacional no traslucen ninguna estructura. Por ejemplo, la base de datos podría no dejar claro a primera vista que una empresa consta de una sede central, cinco secciones nacionales, 25 divisiones y 100 departamentos. Para satisfacer ese vacío se están gestando diversos modelos de bases de datos "dirigidas a objetos" (capaces de representar la estructura directamente). Tan rápida evolución no es ni accidental ni indeseable. Constituye, por contra, el marchamo de la técnica asociada a la información.

Lejos de representar un ejemplo arquetípico, las bases de datos relacionales son un caso prácticamente único. Ningún otro tipo de documento digital posee una base tan formal para la normalización. Los documentos creados por los procesadores de texto, los programas de grafismo, las hojas de cálculo o los programas hipermediáticos encierran mayor diversidad. La incompatibilidad de los ficheros creados por los procesadores de texto sirve de ejemplo de este problema, que no surgió simplemente porque las compañías se esforzasen en diferenciar sus productos en el mercado. Se trata más bien de una secuela inmediata de la tendencia de la técnica a adaptarse a las necesidades que se les van creando a los usuarios.

Hasta el momento, ninguna aplicación de uso corriente está lista para constituirse en norma. Carecemos de una comprensión formal y aceptada de los procedimientos con que las personas manipulan información. Por consiguiente, resulta prematuro enumerar las clases más importantes de aplicaciones digitales, y no digamos, circunscribir sus capacidades mediante normas. Sería fútil obligar a los usuarios a aceptar las limitaciones impuestas por tales normas, o imponer que todos los documentos digitales contengan sólo texto, a modo de mínimo común denominador. La revolución informática extrae su impulso precisamente del atractivo de las nuevas posibilidades. La definición de normas de larga duración para los documentos digitales podría resultar factible cuando la ciencia informática descanse sobre cimientos más formales, pero tales estándares no ofrecen todavía una solución.



5. CLAVE DE CODIFICACION para desvelar la organización de una corriente de bits. En este caso, los cuatro primeros bits representan el entero 7, lo que significa que los bytes restantes tienen cada uno longitud de siete bits. No hay, sin embargo, forma de saber la longitud de la clave de codificación a partir de la corriente de bits propiamente dicha. Si tomáramos como clave los cinco primeros bits, concluiríamos erróneamente que los bytes restantes constaban de 15 bits.

La traducción de documentos a sucesivas normas de corta duración ofrece sólo falsas esperanzas. La sucesiva traducción elude la necesidad de una normalización definitiva, pero cada traducción provoca nuevas pérdidas. ¿Tendría el mismo impacto literario una versión moderna de la *Ilíada* de Homero si se hubiera traducido a través de una serie de lenguajes intermedios, en lugar de hacerlo desde los textos griegos más antiguos que han sobrevivido? En teoría, la traducción de un documento mediante una serie de estándares debería permitir la reconstrucción del documento original. Pero eso exigiría que cada traducción fuese reversible sin pérdida, lo que no suele darse.

Finalmente, la traducción adolece de un fallo fatal. A diferencia de nuestro idioma o del griego clásico, cuya semántica y potencia expresiva son poco más o menos equivalentes, los documentos digitales están evolucionando con tal velocidad, que inevitablemente han de producirse desviaciones en la forma de los documentos. Las formas nuevas no siempre subsumen a sus predecesoras ni admiten compatibilidad con formatos anteriores. Los documentos antiguos no siempre pueden traducirse de manera significativa a formas nuevas; con frecuencia, resulta imposible traducir a la inversa un archivo actual y devolverlo a su forma primitiva. En este sentido, muchas bases de datos antiguas, de tipo jerárquico, hubieron de rediseñarse por completo para adaptarlas al modelo relacional, lo mismo que las bases de datos relacionales experimentan hoy un proceso de reestructuración para acomodarlas a los modelos "objetuales" que están apareciendo. Los desplazamientos de este tipo hacen difícil, o incluso carente de sentido, la traducción del documento a nuevas formas normalizadas.

La alternativa a la traducción de un documento digital consiste en examinarlo mediante el programa que lo produjo. En principio no sería obligado movernos con el soporte lógico original. Si pudiéramos describir su comportamiento con plena independencia del sistema de computación, las generaciones venideras podrían volver a crear el comportamiento del pro-

grama y, por tanto, leer el documento. Pero la ciencia informática no es capaz todavía de describir el comportamiento de los soportes lógicos con la profundidad suficiente para que esto funcione, ni es verosímil que lo consiga en un futuro cercano. Para reproducir el comportamiento de un programa no queda hoy más remedio que ejecutarlo.

Por esta razón resulta preciso guardar los programas que generan nuestros documentos digitales, así como toda la base informática requerida para hacerlos funcionar. Aunque la tarea es monumental, es teóricamente factible. Los autores suelen incluir un programa de aplicación adecuado y un sistema operativo para facilitar a los destinatarios la lectura de sus documentos digitales. Ciertas aplicaciones y sistemas operativos pueden ser ubicuos; en tal caso, basta que los autores se lo indiquen a sus lectores. En Internet se dispone de programas gratuitos, de dominio público. Además, cuando los programas con propietario quedan anticuados suelen caducar los derechos de "copyright", quedando a libre disposición de futuros usuarios.

¿Cómo podremos disponer de los equipos materiales en los que ejecutar los programas y bases operativas de sistemas anticuados? Cierto número de museos especializados y de foros de "retrocomputación" se esfuerzan por mantener en funcionamiento ordenadores que hace tiempo quedaron fuera de servicio. A pesar del innegable encanto de este empeño de arqueología informática, el método es, en última instancia, fútil. El costo de la reparación o sustitución de componentes desgastados (y de mantener el saber técnico necesario para esta labor) acabará por pesar más que la demanda hacia cualquier ordenador periclitado.

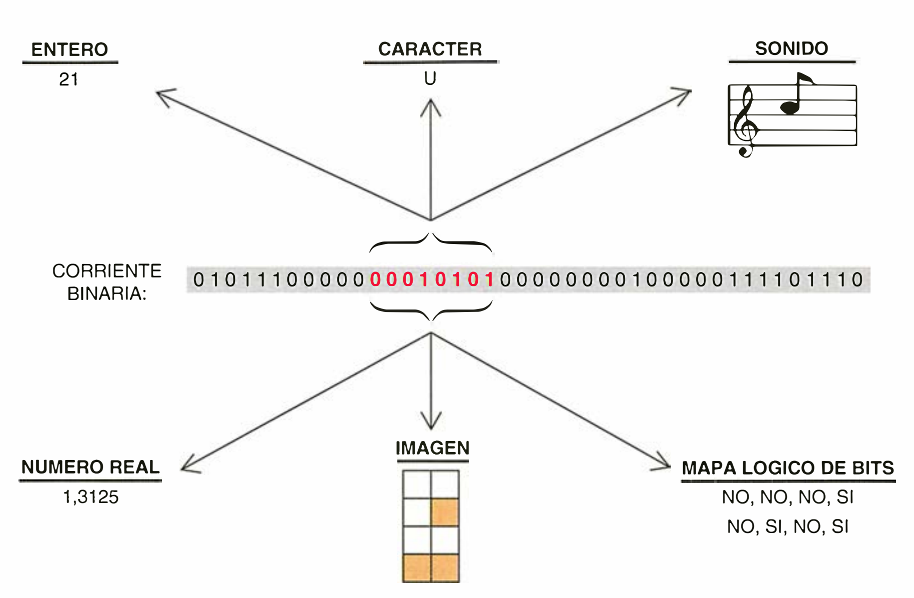
Salvar trocitos de historia

Por fortuna, los ingenieros de programación pueden preparar programas especiales, llamados emuladores, que remedan el comportamiento de los equipos físicos. Suponiendo que los ordenadores alcancen mucha mayor potencia, deberían ser capaces de emular bajo demanda sistemas anticuados. El principal inconveniente de la emulación es que exige una especificación minuciosa del equipo a remedar. Para que la posteridad pueda leerlas, tales especificaciones han de guardarse en una forma digital independiente de cualquier soporte lógico concreto, para no tener que emular un sistema que lea las especificaciones necesarias para la emulación de otro.

Si hay que conservar los documentos digitales y sus programas, es imperativo que su migración no modifique sus corrientes binarias, pues el más mínimo cambio puede corromper los programas y sus archivos. De resultar inevitables tales cambios, han de ser reversibles y sin fugas. Es preciso, además, registrar suficientes pormenores de cada transformación, para permitir la reconstrucción de la corriente binaria original. Aunque podemos diseñar las corrientes binarias de suerte tal que sean inmunes a cualquier cambio esperado, la migración futura podría introducir alteraciones inesperadas. A modo de ejemplo, una compresión de datos agresiva puede convertir una corriente binaria en una aproximación de sí misma, tornando imposible una reconstrucción minuciosa y fiel de la corriente original. De igual manera, la encriptación bloquea la recuperación de la corriente binaria original sin la clave de decodificación.

Lo ideal sería que las corrientes binarias quedaran selladas en sobres virtuales: sus contenidos se conservarían al pie de la letra, y la información contextual asociada con cada sobre describiría su contenido y el historial de sus transformaciones. Sería preciso que esta información se grabara en forma digital (para garantizar su supervivencia), pero también sería preciso que estuviera codificada en una forma que las personas pudieran leer mejor que la corriente binaria propiamente dicha, para así resolver el problema del lanzamiento. En consecuencia, hemos de adoptar normas de lanzamiento para la codificación de información contextual; bastaría para ello una norma sencilla, en texto puro. Cada vez que se copiara una serie binaria en un soporte nuevo, el contexto asociado a ella podría trasladarse a una norma de lanzamiento actualizada. (En esta situación, resultaría aceptable una traducción irreversible, porque tan sólo se requiere mantener el contenido semántico del contexto original.) Estas normas sirven también para codificar las especificaciones de los equipos físicos necesarias para la construcción de emuladores.

¿En qué situación quedan, pues, mis nietos? Si incluyo en el disco toda la base informática requerida juntamente con especificaciones completas y fáciles de descifrar concernientes al equipo físico necesario, tal vez logren generar un emulador capaz de ejecutar los programas originales encargados de mostrarles mi documento. Les deseo suerte.



6. LA INTERPRETACION de una corriente de bits es imposible sin información contextual. Esta secuencia de ocho bits admite, al menos, seis modos de interpretación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UNDERSTANDING ELECTRONIC INCUNABULA: A FRAMEWORK FOR RESEARCH ON ELECTRONIC RECORDS. Margaret Hedstrom en *American Archivist*, vol. 54, n.º 3, páginas 334-354; verano de 1991.

ARCHIVAL THEORY AND INFORMATION TECHNOLOGIES: THE IMPACT OF INFORMATION TECHNOLOGIES ON ARCHIVAL PRINCIPLES AND PRACTICES. Charles M. Dollar. Dirigido por Oddo Bucci. Information and Documentation Series n.º 1, Universidad de Macerata, Italia, 1992.

SCHOLARLY COMMUNICATION AND INFORMATION TECHNOLOGY: EXPLORING THE IMPACT OF CHANGES IN THE RESEARCH PROCESS ON ARCHIVES. Avra Michelson y Jeff Rothenberg en *American Archivist*, vol. 55, n.º 2, págs. 236-315; primavera de 1992.

El prion en la patología

Rechazada antaño la posibilidad de su existencia, los patólogos comienzan a ver, en los priones, los responsables de diversas enfermedades genéticas o espontáneas de carácter infeccioso

Stanley B. Prusiner

Hace quince años provoqué una ola de escepticismo cuando propuse que los agentes infecciosos que causan ciertas enfermedades degenerativas del sistema nervioso central en animales y, más raramente, en el hombre podrían ser meras proteínas. Una afirmación de ese tenor caía de plano en la herejía. De acuerdo con el dogma imperante, los agentes de enfermedades transmisibles requerían material genético, compuesto por ácido nucleico (ADN o ARN); era éste imprescindible para que la infección se asentara en el huésped. Los propios virus, ínfimos entre los agentes infecciosos, precisan de ese material para dirigir la síntesis de las proteínas que necesita su replicación.

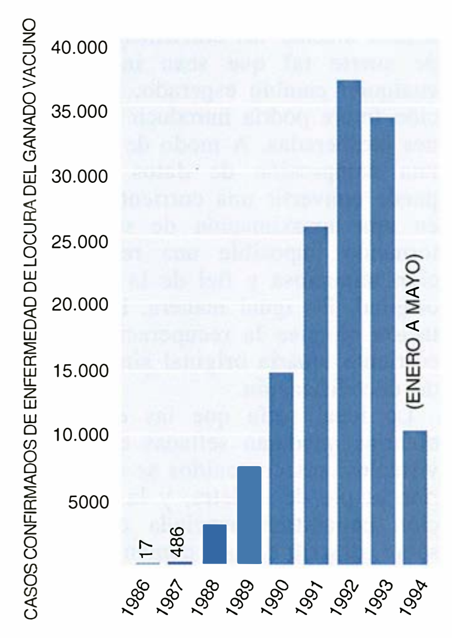
Más tarde, se pondría en cuestión otra conclusión a la que habíamos llegado en mi laboratorio: estas "partículas proteínicas infecciosas" —o "priones"— podrían ser el sustrato de enfermedades, hereditarias o contraíbles. Este comportamiento dual era un fenómeno desconocido. Volvimos a encontrar resistencia cuando avanzamos otro paso más y adujimos que los priones se multiplican por una vía increíble: convierten proteínas normales en moléculas peligrosas sin más que modificar su forma.

La acumulación de datos experimentales y clínicos nos ha dado la razón. Los priones son responsables de afecciones contagiosas y hereditarias relacionadas con la conformación de las proteínas. Pueden causar también enfermedades esporádicas, en las que ni la transmisión de unos individuos a otros ni la herencia resulta evidente.

Las enfermedades de origen priónico son letales. Suelen recibir la denominación común de encefalopatías espongiformes, porque producen en el cerebro abundantes oquedades. Permanecen latentes durante años (decenios en el hombre) y se hallan muy extendidas entre los animales. La forma más común es el "scrapie" o prurito lumbar, que se da en la oveja y en la cabra. El animal pierde la coordinación, hasta el punto de que no puede mantenerse en pie. Se torna irritable y, en algunos casos, sufre un prurito intenso que le lleva a arrancarse la lana o pelo.

En los animales, los priones causan también la encefalopatía transmisible, la encefalopatía espongiforme de los felinos y encefalopatía espongiforme del ganado vacuno. Esta última, conocida a menudo con el nombre de enfermedad de la locura de la vaca, es la más preocupante. Gerald A. H. Wells y John W. Wilesmith identificaron esta enfermedad en 1986, cuando empezó a afectar a las vacas en Gran Bretaña. La fuente de la epidemia naciente se relacionó pronto con el suplemento del pienso que incluía harina de carne y huesos de ovejas muertas.

Los métodos para procesar los desechos de oveja habían cambiado a finales de los setenta. Si antes se conseguía eliminar el agente del prurito lumbar en el suplemento del pienso, ahora parecía que no. El go-





1. GANADO INCINERADO para prevenir la propagación de la enfermedad de la "locura de la vaca", que desde mediados de los ochenta ha atacado a más 130.000 cabezas de ganado vacuno en Gran Bretaña. Se trata de una de las varias enfermedades neurodegenerativas letales que se presentan en el hombre y animales y cuyo origen se atribuye a los priones, unas proteínas infecciosas.

bierno británico prohibió en 1988 el uso de suplementos de pienso derivados de animales. A muchas personas, sin embargo, no se les ha quitado el miedo de si desarrollarán la enfermedad por haber consumido carne contaminada.

La vinculación de los priones con enfermedades humanas no es tan diáfana. El "kuru", o "muerte de la risa", se ha detectado sólo entre los fore de Papúa Nueva Guinea. La describieron, en 1957, Vincent Zigas y D. Carleton Gajdusek; revelaron que muchos habitantes de esa zona habían adquirido una enfermedad rara, de carácter letal, definida por pérdida de coordinación (ataxia) que a menudo acababa en demencia. Los individuos afectados probablemente adquirían el kuru a través de canibalismo ritual: la tribu fore honraba a los muertos comiéndose sus sesos. Esta práctica se ha abolido y el kuru ha desaparecido casi por completo.

La enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, por contra, se presenta en todas partes y suele manifestarse como demencia. En la mayoría de los casos aparece esporádicamente, y afecta a una persona por millón, alrededor de los sesenta años. En un 10 a 15 % de los casos es hereditaria; en un porcentaje muy inferior es yatrogénica: se propaga al intentar tratar algún otro problema médico. La enfermedad yatrogénica de Creutzfeldt-Jakob se ha transmitido al parecer por trasplante de córnea, implantes de duramadre o electrodos en el cerebro, uso de instrumentos quirúrgicos contaminados e inyección de hormonas del crecimiento obtenidas a partir de glándulas hipofisarias humanas (antes de que se contara con la versión recombinante de la hormona del crecimiento).

En el hombre se presenta también la enfermedad de Gerstmann-Sträussler-Scheinker (que se manifiesta por ataxia y otros signos de daño cerebelar) y el insomnio familiar letal (en el que la demencia sigue a la dificultad de conciliar el sueño). Ambas afecciones, hereditarias por lo común, aparecen en la madurez. El insomnio familiar letal ha sido descubierto recientemente por Elio Lugarest, Rossella Medori y Pierluigi Gambetti.

STANLEY B. PRUSINER enseña neurología y bioquímica en la Universidad de California en San Francisco.

Fue en 1972 cuando se despertó mi curiosidad por las enfermedades relacionadas con los priones, siendo residente de neurología en la facultad de medicina de la Universidad de California en San Francisco. Había perdido entonces a uno de mis pacientes con enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Al revisar la bibliografía sobre enfermedades afines, me enteré de que el prurito lumbar, la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob y el kuru se transmitían a través de la inyección de extractos de cerebros enfermos en el cerebro de animales sanos. Estas infecciones se atribuían a un virus lento, que nadie había conseguido aislar.

Leí un informe del grupo encabezado por Tikvah Alper donde se sugería que el agente causante del prurito lumbar podría carecer de ácidos nucleicos; éstos suelen degradarse por



radiaciones ultravioleta o ionizantes. Cuando los ácidos nucleicos de los extractos de cerebro infectado se habían destruido así, los extractos retenían su capacidad transmisora del prurito lumbar. Si la entidad carecía de ADN y ARN, resultaba evidente que no se trataba de un virus o de cualquier otro tipo conocido de agente infeccioso, todos los cuales contienen material genético. ¿De qué agente se trataba? Los investigadores dejaron campar la imaginación, pero nadie aportó una respuesta sólida.

Desde el momento en que monté mi propio laboratorio en la Universidad de California en San Francisco, me propuse resolver el misterio. Ocurría en 1974. El primer paso tenía que ser de carácter mecánico: purificar el material infeccioso de los cerebros de animales afectados por prurito lumbar y analizar su composición. La tarea resultó ser agobiante; muchos lo habían intentado en el pasado, sin éxito. Para 1982, habíamos hecho algunos progresos, produciendo extractos de cerebro de hámster constituidos casi exclusivamente por material infeccioso. Habíamos sometido también los extractos a una serie de pruebas que nos revelaran la naturaleza del componente activo.

Todos nuestros resultados apuntaban hacia una conclusión desconcertante: el agente infeccioso del prurito lumbar (y quizá de enfermedades afines) carecía de ácido nucleico y estaba constituido sobre todo, si no exclusivamente, por proteínas. No había ADN ni ARN, pues, lo mismo que Alper, comprobamos que los procedimientos degradantes de ácidos nucleicos no redujeron la infectividad. Sabíamos que la proteína sí era un componente esencial porque las técnicas desnaturalizadoras de proteínas mermaban la eficacia infecciosa. Así acuñé para este tipo de vector el término "prion", que lo distinguiera de virus, bacterias, hongos y otros agentes patógenos conocidos. Observamos que el prion del prurito lumbar contenía una sola proteína; le dimos el nombre de PrP ("proteína del prion").

¿Dónde residían las instrucciones específicas de la secuencia aminoacídica de la PrP? ¿Las transportaba un fragmento no detectado de ADN que viajaba con la PrP, o se encerraban en un gen alojado en los cromosomas? La clave nos la proporcionó la identificación, en 1984, de unos 15 aminoácidos en un extremo de la proteína PrP. Para acotar esa secuencia corta de aminoácidos contamos con la ayuda de Leroy E. Hood.

El conocimiento de la secuencia permitió construir sondas moleculares, o detectores, capaces de indicar si las células de mamíferos transportaban el gen de la PrP. Con sondas producidas por el equipo de Hood, Bruno Oesch demostró que las células del hámster portaban un gen para la PrP. Casi al mismo tiempo, Bruce Chesebоro preparó sus propias sondas y estableció que las células del ratón también albergaban ese gen. Se aisló el gen y se estableció que no residía en los priones, sino en los cromosomas del hámster, ratón, hombre y otros mamíferos. Y lo que revestía mayor interés: se observó que la mayoría de las veces estos animales producen PrP sin que desarrollen la enfermedad.

Algunos se apresuraron a denunciar que habíamos cometido un craso error; en su opinión, la PrP no tenía nada que ver con las enfermedades relacionadas con los priones. Pero cabía también la posibilidad de que la PrP se presentara bajo dos formas, una causante de enfermedad y otra inocua. No tardamos en demostrar que esta segunda interpretación era la correcta.

La clave decisiva fue la resistencia que la PrP encontrada en los cerebros infectados oponía a la degradación por proteasas, enzimas celulares. La mayoría de las proteínas de las células se degradan con bastante facilidad. Por tanto, sospeché que, si existía una forma de PrP normal, ino-

ENFERMEDAD	SINTOMAS TIPICOS	VIA DE PROPAGACION	DISTRIBUCION	DURACION DE LA ENFERMEDAD ACTIVA
Kuru	Pérdida de coordinación, seguida a menudo de demencia	Infección (probablemente por canibalismo, que cesó en 1958)	Sólo se conoce en los altos de Papúa Nueva Guinea; desde 1957 se han identificado unos 2600 casos	De tres meses a un año
Enfermedad de Creutzfeldt-Jakob	Demencia, seguida de pérdida de coordinación, aunque a veces esa secuencia se invierte	De ordinario desconocida (en la enfermedad "esporádica") En un 10 a un 15% de los casos, la herencia de una mutación del gen que determina la proteína del prion (PrP) Raramente, por infección (como consecuencia de un tratamiento médico)	*Forma esporádica*: 1 persona por millón en todo el mundo *Forma heredada*: se ha detectado en unas 100 familias *Forma infecciosa*: se han identificado unos 80 casos	Alrededor de un año; puede ir de un mes a 10 años
Enfermedad de Gerstmann-Sträussler-Scheinker	Pérdida de coordinación, seguida de demencia	Herencia de una mutación en el gen PrP	Se han identificado unas 50 familias	De dos a seis años
Insomnio familiar letal	Trastornos del sueño y alteraciones del sistema nervioso autónomo, seguidos de insomnio y demencia	Herencia de una mutación en el gen PrP	Se han identificado nueve familias	Alrededor de un año

2. ENFERMEDADES PRIONICAS DEL HOMBRE. Con períodos de incubación de 30 o más años, pueden dar lugar a un declive progresivo de las funciones cognitivas y motoras; de ahí que los perfiles diferenciadores resulten a veces borrosos. A medida que se vayan descubriendo las mutaciones genéticas subyacentes en las distintas formas de estas enfermedades vinculadas al parentesco familiar, podrán identificarse tales enfermedades por sus mutaciones asociadas.

cua, ésta debería ser susceptible de degradación. Ronald A. Barry identificó esta forma hipotética sensible a proteasas. Quedaba, pues, claro que la PrP causante del prurito lumbar era una variante de una proteína normal. Llamamos "PrP celular" a la proteína normal y a la forma infecciosa, resistente a las proteasas, "PrP del prurito lumbar" (*scrapie PrP*). Esta última expresión designa ahora las moléculas de proteína que constituyen los priones de todas las enfermedades semejantes al prurito lumbar que se dan en animales y en el hombre.

Confiábamos de entrada en el uso del gen de la PrP para generar copias puras de PrP. Podríamos así inyectar en animales esta proteína sin que ningún virus escurridizo se uniese a ella. Si la inyección indujera prurito lumbar, se demostraría que las moléculas proteicas eran los vectores de la enfermedad. Pero, hacia 1986 ya sabíamos que nuestro plan no resultaría. Por un lado, no era fácil que el gen produjera las cantidades suficientes que íbamos a necesitar para nuestros estudios. Por otro lado, la proteína que se sintetizaba correspondía a la forma normal, la PrP celular. La suerte nos acompañó mientras trabajábamos en otro problema; hallamos una vía alternativa para demostrar que los priones podrían transmitir el prurito lumbar sin ayuda de ningún ácido nucleico concomitante.

En muchos ejemplos humanos, las enfermedades afines al prurito lumbar parecían ocurrir sin un contagio previo; en algunas familias tenían visos de heredarse. (Los científicos saben hoy que alrededor del 10 por ciento de las enfermedades priónicas son familiares y afectan a la mitad de los componentes.) Era ese fenómeno lo que atrajo nuestra atención. ¿Se daban los priones con menos frecuencia de lo que en un principio se pensó? ¿Eran responsables de la aparición de enfermedades contagiosas o hereditarias?

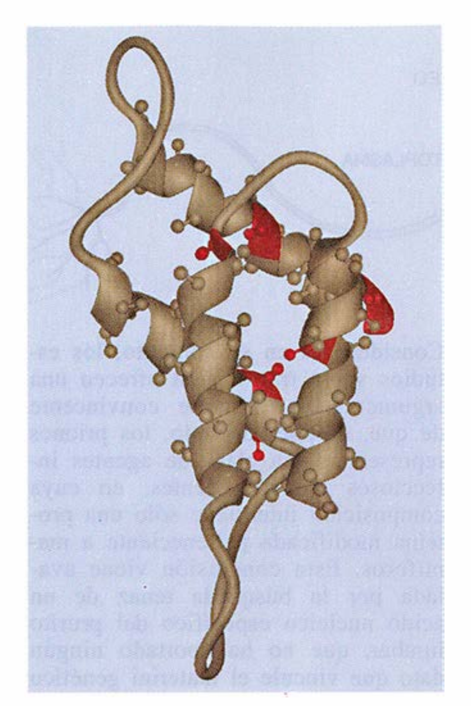
En 1988 se obtuvo la primera prueba de herencia de enfermedades priónicas. Clonamos un gen de PrP de un moribundo que padecía la enfermedad de Gerstmann-Sträussler-Scheinker; afección que le venía de familia. Comparamos su gen con los genes de la PrP procedentes de una población sana y encontramos una leve anomalía, una mutación puntual.

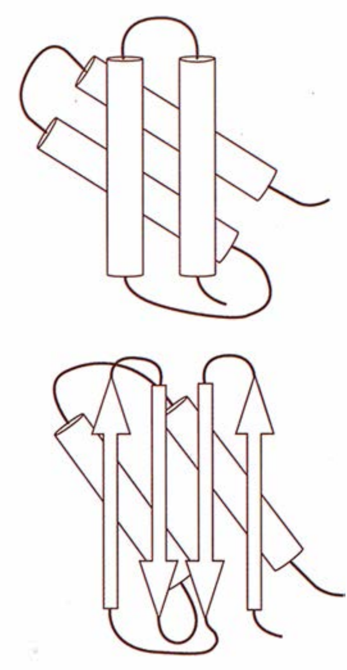
Para comprender la naturaleza de esta mutación, conviene recordar algunas nociones sobre la organización de los genes. Estos constan de dos hebras de ADN formadas, a su vez, por nucleótidos, unidades estructurales que difieren entres sí por sus bases nitrogenadas. Las bases de una hebra están alineadas frente a las de la otra hebra y unidas a través de puentes de hidrógeno. Las parejas de bases así enfrentadas dan lugar a los "peldaños" que integran la escalera de ADN. Además de mantener firme la escalera, estos pares determinan la secuencia de aminoácidos que se encadenan en proteínas. El conjunto de tres pares de bases —un codon— especifican un aminoácido. Nuestro paciente agonizante presentaba un par de bases sustituido por otro (uno entre más de 750). El cambio había alterado la información del codon 102, que reemplazaba el aminoácido prolina por la leucina en la proteína PrP.

Con la ayuda del equipo de Tim J. Crow y Jurg Ott descubrimos dicha mutación en genes de un gran número de individuos con la enfermedad de Gerstmann-Sträussler-Scheinker, y demostramos la significación estadística de la elevada incidencia en las familias afectadas. En otras palabras, establecimos la vinculación genética entre la mutación y la enfermedad, lo que respaldaba la hipótesis que atribuía la causa a la mutación mencionada. A lo largo de los seis últimos años se han descubierto hasta 18 mutaciones en familias con enfermedades priónicas heredadas; para cinco de estas mutaciones, se han acumulado ya casos suficientes que demuestran su carácter genético.

El descubrimiento de las mutaciones nos permitió desechar la posibilidad de que un ácido nucleico acompañase al prion y dirigiese su multiplicación. Podíamos crear ratones transgénicos que portasen un gen de PrP mutado. Si la presencia del gen modificado en estos animales comportara la aparición del prurito lumbar, y si el tejido cerebral de los animales transgénicos causara el prurito lumbar en animales sanos, podríamos afirmar entonces que la proteína codificada por el gen mutado había sido la única responsable de la transmisión de la enfermedad. Con la colaboración de Karen Hsiao, Darlene Groth y Stephen J. De-Armond demostré que el prurito lumbar se genera y se transmite de ese modo.

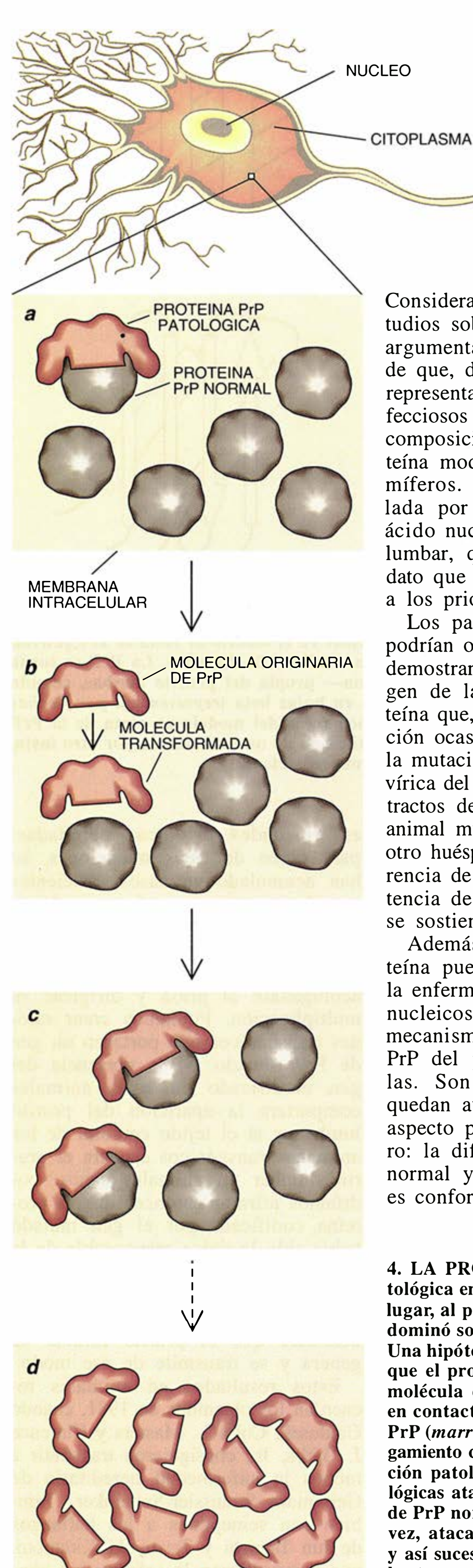
Estos resultados en animales recuerdan los obtenidos en 1981, cuando Gajdusek, Colin L. Masters y Clarence J. Gibbs, Jr., consiguieron transmitir a monos la enfermedad hereditaria de Gerstmann-Sträussler-Scheinker. También son semejantes a los hallazgos de Jun Tateishi y Tetsuyuki Kitamoto, que transmitieron la enfermedad congénita de Creutzfeldt-Jakob a ratones.





FUENTE: Fred E. Cohen

3. LA PROTEINA DEL PRION (PrP) suele ser inocua. En su estado benigno, la molécula se pliega en múltiples hélices (*espirales en el modelo de cinta de la izquierda y cilindros en la representación esquemática, arriba a la derecha*). La PrP se torna infecciosa en su forma "scrapie" —un prion— propia del prurito lumbar, cuando una buena parte de la estructura se estira en hojas beta (*representada por flechas en el dibujo inferior a la derecha*). Los tonos rojos del modelo en cinta de la PrP normal resaltan las posiciones donde la sustitución de un aminoácido por otro insta, probablemente, el plegamiento hacia la forma infecciosa.



Considerados en su conjunto, los estudios sobre transmisión ofrecen una argumentación bastante convincente de que, después de todo, los priones representan una clase de agentes infecciosos sin precedentes, en cuya composición interviene sólo una proteína modificada perteneciente a mamíferos. Esta conclusión viene avalada por la búsqueda tenaz de un ácido nucleico específico del prurito lumbar, que no ha aportado ningún dato que vincule el material genético a los priones.

Los partidarios de la teoría vírica podrían objetar que no hemos podido demostrar todavía nuestra idea. Si el gen de la PrP determinara una proteína que, al mutar, facilitase la infección ocasionada por un virus ubicuo, la mutación conduciría a la infección vírica del cerebro. La inyección de extractos de cerebro procedentes de un animal mutante diseminaría el mal en otro huésped. Ahora bien, dada la carencia de datos que indiquen la existencia de un virus, esta hipótesis no se sostiene.

Además de demostrar que una proteína puede multiplicarse y producir la enfermedad sin la ayuda de ácidos nucleicos, hemos ahondado en los mecanismos de la propagación de la PrP del prurito lumbar en las células. Son muchos los detalles que quedan aún por desentrañar, pero un aspecto parece estar ya bastante claro: la diferencia básica entre la PrP normal y la PrP del prurito lumbar es conformacional. Evidentemente, la proteína del prurito lumbar se propaga al entrar en contacto con moléculas normales de PrP, deshace el plegamiento de éstas e insta la transformación de la configuración original en otra propia del prurito lumbar. Este cambio inicia una cascada en la que las moléculas recién transformadas inducen el cambio de forma en otras moléculas normales de PrP, y así sucesivamente. Proceso que acontece en una membrana del interior de la célula.

4. LA PROPAGACION DE LA PrP patológica en las neuronas del cerebro tiene lugar, al parecer, por una suerte de efecto dominó sobre alguna membrana interna. Una hipótesis que goza de favor mantiene que el proceso comienza (*a*) cuando una molécula de PrP patológica (*rojo*) entra en contacto con una molécula normal de PrP (*marrón*) e induce cambios en su plegamiento que desembocan en la conformación patológica (*b*). Las partículas patológicas atacan entonces a otras moléculas de PrP normales (*c*). Esas moléculas, a su vez, atacan a otras moléculas normales, y así sucesivamente (*flecha interrumpida*), hasta que la PrP patológica acumulada alcanza niveles peligrosos (*d*).

Comenzamos, pues, a pensar que las diferencias de la PrP —la celular y la del prurito lumbar— debían ser conformacionales, vista la improbabilidad de que fueran de otro tipo. Desde hace tiempo se sabe que la forma infecciosa presenta a menudo la misma secuencia que la del tipo normal. Cierto es que las moléculas de partida idénticas pueden sufrir luego modificaciones químicas que alteren su actividad; pero las investigaciones exhaustivas de Neil Stahl y Michael A. Baldwin no han detectado diferencias de este tipo.

¿Dónde estriban las diferencias estructurales entre la PrP normal y la patológica? Keh-Ming Pan señala que la proteína normal consta fundamentalmente de hélices alfa, regiones en las que el esqueleto proteínico dibuja una espiral de cierto tipo; la forma propia del prurito lumbar, sin embargo, contiene hebras beta, regiones donde la molécula está desplegada. Agrupaciones de estas hebras beta originan la hoja plegada beta. Fred E. Cohen ha recurrido a la modelización molecular para predecir la estructura de la proteína normal, basándose en la secuencia de aminoácidos. De acuerdo con sus resultados, la proteína se plegaría para dar lugar a una estructura compacta que posee en su centro cuatro hélices. Menos se sabe acerca de la estructura, o estructuras, que adopta la PrP del prurito lumbar.

Los datos que apoyan la hipótesis de que la PrP del prurito lumbar induzca el cambio de una molécula de PrP con sus regiones de hélice en otra con hojas beta se deben a dos estudios principales. María Gasset determinó que los péptidos sintéticos (cadenas cortas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos) correspondientes a tres de las cuatro supuestas regiones de hélice alfa de la PrP pueden plegarse en hojas beta. Y Jack Nguyen demostró que, en su conformación de hoja beta, esos péptidos pueden imponer una estructura de hoja beta a los péptidos helicoidales de la PrP. Más recientemente,

Byron W. Caughey y Peter Lansbury han señalado que la PrP celular se convierte en la PrP del prurito lumbar, si se mezclan ambas proteínas en un tubo de ensayo.

Es muy probable que las moléculas de PrP procedentes de genes mutados no adopten de inmediato, recién sintetizadas, la conformación propia de la del prurito lumbar. Si así fuera, las personas portadoras de genes mutantes presentarían la enfermedad en su infancia. Sospechamos que las mutaciones del gen del PrP hacen, a las proteínas resultantes, susceptibles al cambio desde una forma helicoidal hacia la de hoja beta. Se supone que ha de transcurrir cierto tiempo antes de que una molécula se transforme espontáneamente, y más todavía para que la PrP patológica se acumule y lesione el cerebro hasta el grado en que se evidencian los síntomas.

Creo, con Fred Cohen, que podemos explicar por qué las diversas mutaciones advertidas en los genes de la PrP facilitan el plegado en hoja beta. Muchas de las mutaciones observadas en el hombre provocan la sustitución de uno de los aminoácidos por otro dentro de las cuatro hélices presumibles o sus zonas vecinas. La inserción de aminoácidos incorrectos en esas posiciones podría desestabilizar una hélice, aumentando así la probabilidad de que la hélice afectada y sus vecinas se plieguen de nuevo para adquirir la conformación de hoja beta. Hermann Schätzel ha visto, por su parte, que las diferencias inocuas que distinguen de los genes de primates y monos el gen PrP del hombre afectan a los aminoácidos situados fuera de los dominios helicoidales propuestos —donde los aminoácidos divergentes no ejercerían una profunda influencia en la estabilidad de las regiones helicoidales.

Se desconoce el mecanismo en virtud del cual la difusión de la PrP del prurito lumbar daña las células. En los cultivos celulares, la conversión de PrP normal en patológica se produce en el interior de neuronas, una vez que la PrP lumbar se acumula en los lisosomas. En el cerebro, estas vesículas, repletas, podrían estallar y lesionar las células. A medida que mueren las células enfermas y dejan oquedades en el cerebro, sus priones quedarían en libertad para atacar a otras.

Ignoramos si la rotura de la PrP del prurito es lo que produce fragmentos de PrP que se acumulan en placas dentro del cerebro. Esos agregados semejan placas de la enfermedad de Alzheimer, aunque los acúmulos presentes en ésta los integra una proteína diferente. Las placas de PrP son un indicador fiel de infección priónica, aunque no constituyen la base principal de la afección. Muchas personas y animales con enfermedad priónica no desarrollan placa alguna.

Aunque nos falte bastante por averiguar sobre el modo en que la PrP patológica afecta al tejido cerebral, puede preverse que el esclarecimiento de la estructura tridimensional de la proteína PrP facilitará el hallazgo de terapias. Por ejemplo, si el modelo del haz de cuatro hélices de la PrP se confirma, los diseñadores de fármacos podrían encontrar un compuesto que se uniera a una bolsita central, formada por cuatro hélices. Unido de este modo, el fármaco estabilizaría las hélices y evitaría su conversión en hojas beta.

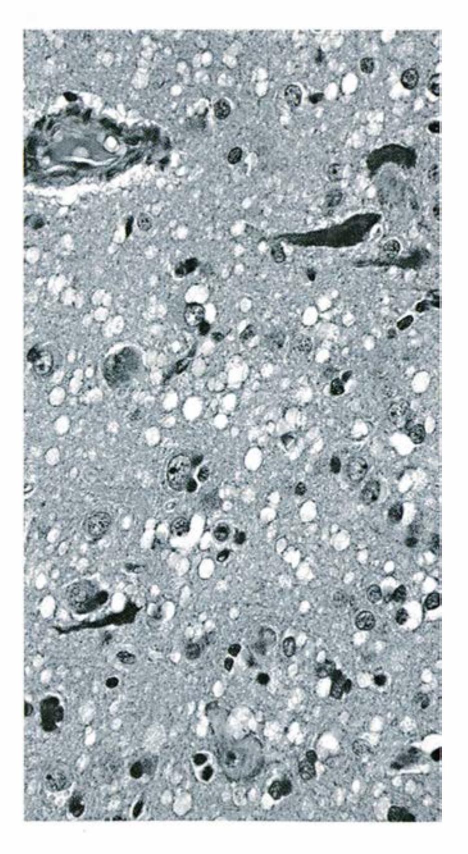
Otra estrategia para una posible terapia se inspira en los trabajos del grupo de Weissmann, quien aplicó la ingeniería genética a la obtención de ratones sin el gen de la PrP, eliminando así su capacidad para producir PrP. Al erradicar un gen y observar las consecuencias que comporta, se infieren las funciones habituales de la proteína determinada por el gen en cuestión. Pero en este caso los animales que carecen de la PrP no desarrollan ninguna anomalía perceptible. Si resulta que la PrP no es esencial, los médicos podrían considerar la administración de terapia antigénica o terapia antisentido al cerebro de pacientes con enfermedades priónicas. Con estas terapias se intenta bloquear genes y evitar la consiguiente producción de proteínas no deseadas. Así podría cortarse la síntesis de PrP y, por tanto, impedir su propagación.

La técnica de eliminación de genes brindó una excelente oportunidad para poner a prueba la hipótesis del prion. Si los animales enfermaran después de la inoculación de priones, su enfermedad indicaría que los priones se multiplican incluso en ausencia de un conjunto preexistente de moléculas de PrP. Como yo suponía, la inoculación de priones no produjo prurito lumbar, y no pudo detectarse signo alguno de replicación del prion.

La multiplicación de la PrP del prurito lumbar y el desencadenamiento de la enfermedad no son las únicas incógnitas que empiezan a despejarse. Se divisa también una respuesta para una vieja cuestión: por qué los priones constituidos por un solo tipo de proteína ejercen una gama tan variable de efectos. Iain H. Pattison obtuvo, hace años, priones de dos grupos distintos de cabras. Los pertenecientes a un grupo dejaban aletargados a los animales en que se inyectaban, mientras que los del segundo los convertían en hiperactivos. En ese mismo orden, sabemos ya que algunos priones provocan la enfermedad con rapidez, mientras que otros lo hacen con lentitud.

Alan G. Dickinson, Hugh Fraser y Moira E. Bruce, que ha examinado los efectos diferenciales de priones de diversas procedencias en el ratón, aducen que sólo los agentes patógenos que contienen ácidos nucleicos muestran pluralidad de cepas; rechazan, por ende, la hipótesis del prion. En su opinión, los virus deben estar en la raíz del prurito lumbar y enfermedades emparentadas. Pero no se han encontratrado ácidos nucleicos víricos. Hay, pues, que buscar en otro sitio las razones de las diferencias.

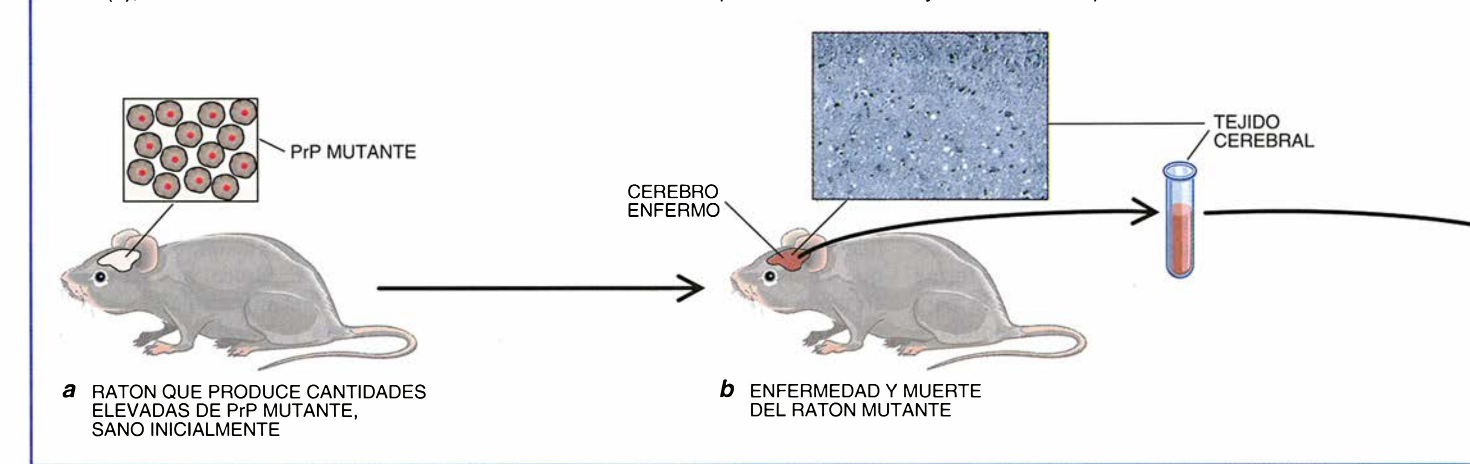
Por ejemplo, ¿pueden los priones adoptar múltiples conformaciones? Plegado de una manera, un prion podría pasar de la forma PrP normal a la forma de prurito de modo muy eficiente, originando breves intervalos de incubación. Plegado de otra



5. OQUEDADES EN EL CEREBRO (*zonas blancas*), rasgo frecuente de las enfermedades priónicas. Confieren al cerebro un aspecto esponjoso. La microfotografía muestra la corteza cerebral de un individuo con enfermedad de Creutzfeldt-Jakob.

Un experimento convincente

Se ha demostrado que los priones, que constan exclusivamente de proteína PrP, pueden transmitir la infección de un animal a otro. El autor y sus colaboradores han creado ratones portadores de muchas copias de un mutante del gen PrP (*a*); estos animales sintetizaban cantidades elevadas de la PrP mutante, algunas de cuyas moléculas parecían adoptar la conformación propia del prurito lumbar. Los ratones acabaron presentando síntomas de daño cerebral y murieron (*b*). Se inyectó tejido cerebral de los animales enfermos en ratones que producían niveles bajos de la misma proteína PrP mutante. Se



a RATON QUE PRODUCE CANTIDADES ELEVADAS DE PrP MUTANTE, SANO INICIALMENTE

b ENFERMEDAD Y MUERTE DEL RATON MUTANTE

manera, podría operar sin esa eficacia. De modo parecido, un "confórmero" podría verse atraído hacia masas nerviosas de una parte del cerebro y otro hacia las neuronas de una zona distinta, con la diferencia consiguiente en los síntomas producidos. Si sabemos que la PrP se pliega por lo menos de dos formas, no debiera sorprendernos que experimentara otras transformaciones estructurales.

Desde mediados de los ochenta venimos ocupándonos del fenómeno de la barrera de especie. Por tal se entiende la existencia de algo que impide que los priones producidos por una especie induzcan la enfermedad en animales de otra especie. La epidemia de la locura del ganado vacuno registrada en Gran Bretaña ha traído a primer plano ese obstáculo. ¿Presenta la barrera de especie una entidad suficiente para impedir que la enfermedad priónica de la vaca salte al hombre?

Pattison, descubridor de la barrera, conoció, en los años sesenta, la dificultad de transmitir a los roedores el prurito lumbar de la oveja. Para acotar la causa del impedimento, Michael R. Scott y yo creamos ratones transgénicos que expresan el gen PrP del hámster sirio, es decir, producen la proteína PrP del hámster. El gen murino difiere del gen del hámster en 16 codones de los 254. Los ratones normales inoculados con priones de hámster no suelen adquirir el prurito lumbar, en tanto que los ratones transgénicos enferman antes de dos meses.

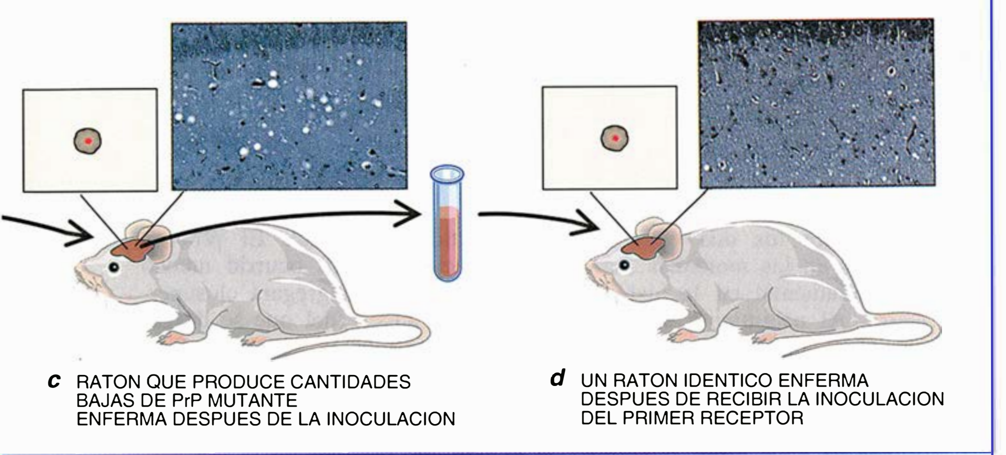
Con la inserción de genes del hámster en el ratón, habíamos franqueado la barrera de especie. Advertimos que la barrera residía en la secuencia aminoacídica de la PrP. Cuanto más se asemeje la secuencia de una molécula de PrP patológica a la secuencia del PrP de su huésped, tanto mayor será la probabilidad de que el huésped adquiera la enfermedad priónica. En cierto ensayo, examinamos ratones transgénicos portadores del gen PrP del hámster sirio, además de su gen propio; producían las formas normales de la PrP correspondientes al hámster y al ratón. Cuando los inoculábamos con priones del hámster, producían nuevos priones de hámster. Así descubrimos que los priones interactuaban de preferencia con PrP celular de composición homóloga, o similar.

La atracción de la PrP patológica por la PrP celular de la misma secuencia probablemente explique por qué el prurito lumbar se propagó entre las vacas de Inglaterra con el pienso de tejido ovino: la PrP bovina difiere de la ovina sólo en siete posiciones. Por contra, las diferencias de secuencia entre la PrP humana y la bovina son mucho mayores; la divergencia se extiende a más de 30 posiciones. Ante tamaña disparidad, la posibilidad de transmisión de la vaca al hombre parece bastante remota. Esta valoración coincide con los estudios epidemiológicos de W. Bryan Matthews, quien no ha encontrado ninguna relación entre el prurito lumbar de la oveja y la incidencia de enfermedad de Creutzfeldt-Jakob en países con una gran cabaña ovina.

Pero dos granjeros que tenían "vacas locas" en su granja han fallecido de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Quizá no exista relación alguna entre sí, pero la situación exige cierta dosis de cautela. Podría suceder que algunos segmentos de la región crítica de la molécula de PrP fueran más importantes que otros para romper la barrera de especie. Si tal acontece, y si la PrP de la vaca tiene un gran parecido con la PrP humana en las regiones críticas, entonces las probabilidades de ese riesgo podrían ser mayores que lo que se desprende de la mera comparación entre secuencias aminoacídicas.

Abordamos la posibilidad de que algunas partes de la molécula de PrP cumplieran un papel importante en la barrera de especie, tras un giro inesperado en la investigación sobre dicho bloqueo. Glenn C. Telling había creado ratones transgénicos portadores de un gen híbrido de PrP, constituido por un fragmento perteneciente al hombre y flanqueado por los correspondientes al de ratón; el gen dio origen a una proteína híbrida. Introdujo luego tejido cerebral de pacientes que habían fallecido por enfermedad de Creutzfeldt-Jakob o por enfermedad de Gerstmann-Sträussler-Scheinker en animales transgénicos. Extrañamente, los animales enfermaban con una mayor frecuencia y rapidez que los ratones portadores de un gen de PrP humano completo, que difiere del múrido en 28 posiciones. Este resultado indicaba que la semejanza en la región central de la molécula de PrP podía importar más que la de los otros segmentos.

eligieron estos ratones como receptores porque la proteína patológica se ve atraída con más intensidad por moléculas de idéntica composición. Los ratones sin inocular no enfermaron (señal de inocuidad en niveles bajos de la proteína aberrante), aunque sí muchos de los tratados (*c*). El tejido cerebral de uno de los animales receptores enfermos, transferido a uno de sus congéneres sanos, produjo la enfermedad (*d*). Si la proteína aberrante hubiera sido incapaz de transmitir la infección, ninguno de los animales inoculados hubiera enfermado.



c RATON QUE PRODUCE CANTIDADES BAJAS DE PrP MUTANTE ENFERMA DESPUES DE LA INOCULACION

d UN RATON IDENTICO ENFERMA DESPUES DE RECIBIR LA INOCULACION DEL PRIMER RECEPTOR

El resultado supuso también un nuevo apoyo a lo que sugerían datos anteriores —obtenidos por Shu-Lian Yang y Albert Taraboulos—, indicativos de que las moléculas sintetizadas por el huésped pueden influir en el comportamiento de la PrP del prurito lumbar. Creemos que, en el estudio del gen híbrido, una proteína murina, quizás una "chaperona" o proteína de acompañamiento, que normalmente participa en el plegamiento de cadenas nacientes de proteínas, reconocía una de las dos regiones de la proteína híbrida PrP derivadas del ratón. Esta proteína acompañante se habría unido a esa región y habría contribuido al plegamiento de la molécula híbrida en la conformación propia del prurito lumbar. La chaperona no proporcionaría una ayuda similar en el ratón que sintetizaba sólo la proteína PrP humana, por la plausible razón de que la proteína humana carece de un sitio de unión para el factor murino.

Algo totalmente imprevisto ha surgido de los estudios con ratones transgénicos que producen cantidades muy elevadas de proteínas PrP normales. DeArmond, David Westaway y George A. Carlson observaron que algunos ratones transgénicos más viejos habían desarrollado una enfermedad caracterizada por rigidez y disminución de su actividad atusadora. Al investigar las causas, vimos que la producción excesiva de PrP puede a la larga conducir a neurodegeneración y a la destrucción de músculos y de nervios periféricos. Tales hallazgos amplían el espectro de las enfermedades priónicas y sugieren la responsabilidad de éstas en afecciones de los músculos y sistema nervioso periférico en humanos.

Las investigaciones centradas en animales con un exceso de producción de PrP nos brindan un beneficio añadido. Ofrecen una pista sobre el mecanismo desencadenante de la forma espontánea de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Durante algún tiempo sospechaba que la enfermedad esporádica podría comenzar cuando el desgaste de los mecanismos vitales desembocara en una mutación del gen de la PrP, al menos, en una célula del organismo. A la larga, la proteína mutada podría adquirir la conformación propia del prurito lumbar y propagarse gradualmente, hasta que la acumulación de esas moléculas alcanzara el nivel crítico para que la enfermedad se hiciera patente. Los estudios con el ratón sugieren que, en algún lugar y momento de la vida de uno entre un millón de individuos, surja la enfermedad esporádica de Creutzfeldt-Jakob, porque la PrP celular pueda convertirse espontáneamente en su forma patológica lumbar. Los experimentos abonan también la posibilidad de que personas que contraen dicha enfermedad produzcan PrP en exceso; pero carecemos de datos incontrovertibles.

Todas las enfermedades priónicas conocidas en el hombre se han reproducido en modelos murinos. Hemos desarrollado un modelo animal de enfermedad priónica esporádica. Ratones inoculados con extractos de cerebro de animales infectados de prurito lumbar y de pacientes que han sufrido la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob han configurado un cuadro de las formas infecciosas de afecciones priónicas. Se han remedado, en ratones transgénicos portadores de genes mutantes de PrP, las enfermedades priónicas hereditarias. Estas representaciones murinas de las enfermedades priónicas que se dan en el hombre deberían crear también sujetos de experimentación de las posibles terapias.

Las investigaciones en marcha podrían ayudar a determinar si priones de otras proteínas intervienen en afecciones neurodegenerativas más comunes, incluida la enfermedad de Alzheimer, la enfermedad de Parkinson y la esclerosis lateral amiotrófica. Existen notables semejanzas entre estas afecciones. A imagen de las enfermedades priónicas, las más extendidas se presentan de manera esporádica, aunque no es insólito su carácter familiar. Todas aparecen en personas de edad media o avanzada y se definen por una patología similar: las neuronas degeneran, se acumulan en placas depósitos de proteínas y las células de la glía (que aportan sostén y alimento a las neuronas) aumentan de tamaño como reacción al daño neuronal. Resulta curioso que, en ninguna de estas afecciones, los leucocitos —omnipresentes guerreros del sistema inmunitario— infiltren el cerebro. Si un virus estuviera involucrado en esas enfermedades, sería obvia la presencia de los leucocitos.

Datos procedentes del ámbito de las levaduras avalan la hipótesis de la existencia de priones cuya secuencia aminoacídica diverja de la proteína PrP. Reed B. Wickner habla de una proteína, la Ure2p, que podría cambiar en ocasiones de conformación, alterando consecuentemente su actividad celular: en una forma, la proteína es activa; en otra, permanece silente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FATAL FAMILIAR INSOMNIA: INHERITED PRION DISEASES, SLEEP, AND THE THALAMUS. Dirigido por C. Guilleminault *et al.* Raven Press, 1994.

MOLECULAR BIOLOGY OF PRION DISEASES. Número especial de *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series B, vol. 343, n.º 1306; 29 de marzo de 1994.

STRUCTURAL CLUES TO PRION REPLICATION. F. E. Cohen, K.-M. Pan, Z. Huang, M. Baldwin, R. J. Fletterick y S. B. Prusiner en *Science*, vol. 264, págs. 530-531; 22 de abril de 1994.

La Tierra antes de Pangea

A través de una odisea de 500 millones de años, América del Norte se desgajó del supercontinente Rodinia, viajó alrededor de los continentes vecinos y volvió para formar parte de Pangea

Ian W. D. Dalziel

El avión se inclinó a la derecha. Desde mi asiento, vi su sombra reflejada en el hielo: los esquíes me hicieron recordar un pato amerizando, extendidas sus patas palmeadas. Conforme el aeroplano se enderezaba, apareció ante nosostros un colosal acantilado; el marrón oscuro de sus rocas contrastaba con el prístino blanco del hielo y la nieve que se desvanecían en el horizonte.

Los estratos inclinados de estas areniscas precámbricas estaban deformados por pliegues en acordeón. Saco varias fotografías. Nada más doblar el acantilado aparece otro. Descansando sobre las areniscas había una delgada capa de roca casi tan blanca como el fondo: calizas cámbricas. La geología básica es muy similar a la del oeste norteamericano, donde trabajo.

Habíamos acudido a las montañas Pensacola de la Antártida para estudiar la relación existente entre las dos subdivisiones geológicas del continente helado, la oriental y la occidental. La Antártida oriental es un antiguo escudo precámbrico situado al sur de Australia, India y Africa; la occidental forma parte del "anillo de fuego", más joven desde el punto de vista geológico y con actividad volcánica, que rodea el océano Pacífico. El borde alzado del escudo oriental se une con la Antártida occidental a través de las montañas Transantárticas, de las cuales las Pensacola forma su extremo septentrional. Una vez levantado el campamento base, estaríamos por fin en las montañas que se alzan en el margen meridional del mismo océano que baña las playas de Los Angeles.

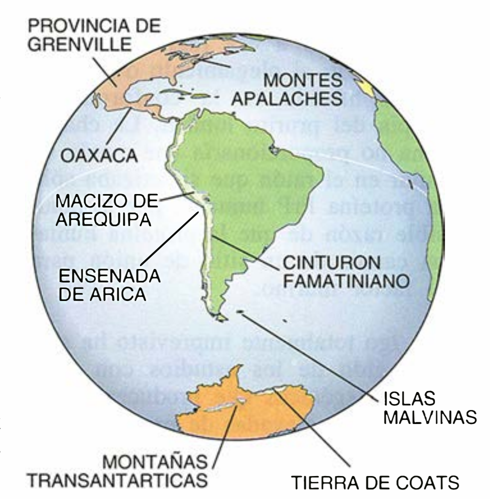
IAN W. D. DALZIEL, del instituto de geofísica de la Universidad de Texas en Austin, lleva estudiando la geología de la Antártida, los Andes, las Caledónidas y el escudo canadiense desde 1963, cuando se doctoró en la Universidad de Edimburgo.

El límite entre los dos tipos de roca expuestos en las montañas Pensacola es fundamental en la historia de la Tierra. Al nacimiento del planeta, hace 4500 millones de años, le siguió el Precámbrico, un largo intervalo de cuatro mil millones de años. Hacia el fin de esta era (unos 750 millones de años atrás, mientras se desarrollaban los primeros organismos pluricelulares de cuerpo blando), se depositaron las areniscas marrones de la subyacente Formación Patuxent que acabábamos de ver. Los estratos se depositaron en un valle fallado ("rift") que se abrió en el escudo continental. Conforme aumentaba la profundidad del rift, los ríos encauzaron sus aguas hacia allí, soltando sobre el fondo del valle su carga de suelos erosionados.

Hace unos 540 millones de años, una explosión de vida animal pluricelular nos introdujo en el período Cámbrico. Innumerables esqueletos cónicos de arqueociátidos se acumularon en los mares someros que habían avanzado sobre las areniscas formando un arrecife a lo largo del borde de la Antártida oriental, que acabó transformándose en caliza: la capa superior de la Formación Patuxent se conoce como caliza Nelson. Dado que los arqueociátidos eran animales de aguas cálidas, lo que ahora constituye el margen occidental del escudo antártico oriental debió de estar situado en latitudes tropicales durante el Cámbrico.

El proceso de formación del rift que indujo la deposición de las areniscas Patuxent refleja la separación de la Antártida oriental de alguna otra masa continental. La divergencia abrió la cuenca del océano Pacífico hace unos 750 millones de años. A continuación se acumularon sobre la Antártida oriental rocas ígneas procedentes de volcanes marítimos y material arrancado del suelo oceánico en proceso de subducción, formando la Antártida occidental. El proceso de formación del rift ocurrió mucho antes de que se congregara el supercontinente Pangea (del que se desgajaron los continentes actuales). Pangea se ensambló hace sólo unos 250 millones de años, al final del Paleozoico. Empezó a fragmentarse durante el período Jurásico de la era Mesozoica, hace unos 170 millones de años, creando el Atlántico y otras cuencas oceánicas jóvenes.

Conforme ascendíamos, en cordada, hacia la cumbre del acantilado, comprobamos que las capas inferiores de los estratos cámbricos, situadas bajo las calizas, estaban constituidas por conglomerados rosas y gruesas areniscas. El mar, a medida que se adentró en el rift, cada vez más profundo, y avanzó sobre el margen en subducción, fue triturando las rocas precámbricas, dando lugar a cantos rodados, guijarros y granos de arena.



1. LAS MONTAÑAS transantárticas delimitan una antigua frontera entre la Antártida oriental y otro continente, probablemente América del Norte. Los Dry Valleys (*derecha*) están tallados en el margen elevado de la cordillera. Las características de la Tierra actual (*arriba*) registran el recorrido de América del Norte alrededor de otros continentes.

El grano de los depósitos se hacía cada vez más fino con la altura y las areniscas cuarzosas que observábamos debajo de la caliza Nelson se nos antojaban viejas amigas. Estaban perforadas de *Skolithus*, madrigueras verticales de gusanos.

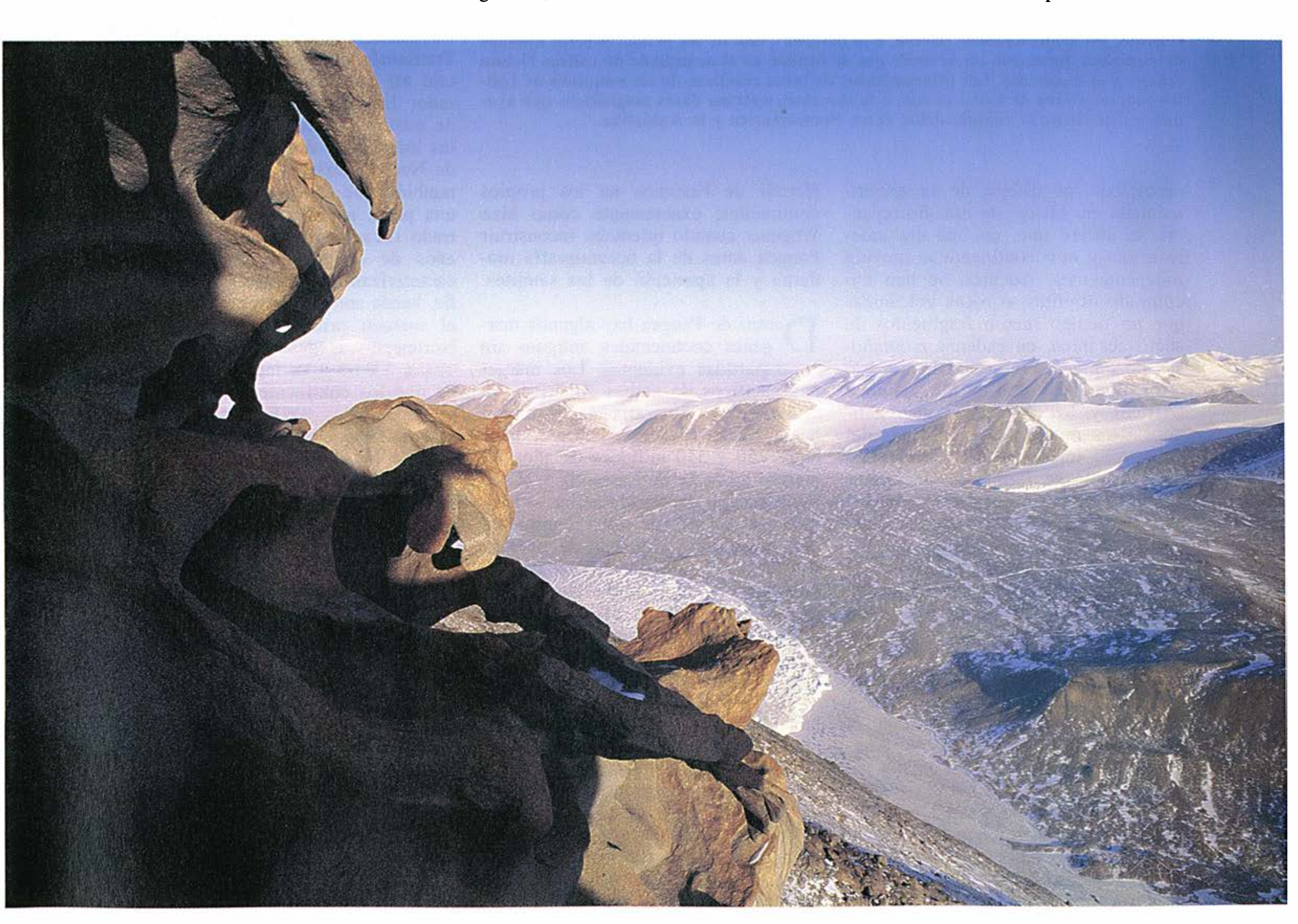
Estos túneles son los únicos rastros de antiguos filtradores, animales que extraían los nutrientes de los sedimentos y dejaban un residuo arcilloso alrededor de sus madrigueras. "Igual que en el oeste de Norteamérica", comenté en voz alta, "y en aquel tiempo, también igual que en las rocas Durness del noroeste de Escocia". En efecto, los estratos depositados por el agua del mar que avanzó hasta cubrir la mayor parte de los continentes hace 540 millones de años (como demuestra la presencia de litorales cámbricos en Wisconsin) son notablemente similares en todos los continentes.

No hay nada como el trato personal con las rocas para establecer una teoría geológica. Las primeras impresiones que tuve de las montañas Transantárticas en 1987 me movieron a plantearme una pregunta que no podía quitarme de la cabeza: ¿pudo el oeste norteamericano haber sido el continente del que se separó la Antártida al final del Precámbrico tras la formación de un rift? ¿Aconteció acaso que sus márgenes, en esa remota época, se hallaran en ambientes similares a los dos lados de una cuenca del océano Pacífico aún más antigua?

La respuesta tiene profundas implicaciones. La paleogeografía global de ese tiempo persiste envuelta en el misterio. Si conociéramos la distribución de los continentes, tendríamos algún punto de apoyo para aproximarnos a las vastas alteraciones ambientales que precedieron al Cámbrico. A finales del Precámbrico hubo varias épocas glaciales; cambió la química oceánica y, con mucha probabilidad, la atmosférica. Los animales pluricelulares evolucionaron, anunciando una eclosión biológica que abarcaba los más remotos antepasados de los vertebrados y, por consiguiente, de los seres humanos.

Es muy difícil cartografiar, con algún grado de certeza, la paleogeografía de un planeta dinámico cuyos continentes no están quietos. Alfred Wegener y otros pioneros de la teoría de la deriva continental observaron que había cadenas montañosas de América del Norte y del Sur, truncadas en los márgenes atlánticos, que encajaban a la perfección, saltado el océano, con cadenas europeas y africanas. Los datos magnéticos y las imágenes tomadas por los satélites, relativos al fondo oceánico, muestran fracturas (muy parecidas a raíles de ferrocarril, a lo largo de las cuales los continentes se deslizaron, apartándose) que nos permiten reconstruir Pangea con gran precisión.

Pero Pangea no fue la configuración original de los continentes; lo señalan pruebas de diverso tipo. Cuando las rocas que contienen hierro se solidifican a partir de la lava, quedan magnetizadas en la dirección del campo magnético terrestre. En América del Norte, la magnetización de rocas consolidadas a partir de lavas








2. ESTRUCTURAS ROCOSAS de la Antártida. Proporcionan pistas sobre los movimientos seguidos por América del Norte. Los pliegues en acordeón (*arriba, a la izquierda*) encontrados en la Formación Patuxent indican el límite precámbrico entre Norteamérica y la Antártida. A medida que un rift iba distanciando a los dos continentes, los arqueociátidos (*arriba, a la derecha*), uno de los primeros seres dotados de esqueleto, formaron un arrecife que se fosilizó en el acantilado de calizas Nelson (*abajo, a la izquierda*). Los afloramientos de lavas riolíticas de los nunataks de Littlewood, en Tierra de Coats (*abajo, a la derecha*), aportan datos magnéticos que ayudan a demostrar la yuxtaposición entre Norteamérica y la Antártida.

premesozoicas difiere de la experimentada en Africa; de esa discrepancia se infiere que, en una era anterior, uno y otro continente se movían independientes. Además, se han encontrado ofiolitas, o rocas volcánicas que un tiempo fueron fragmentos de suelo oceánico, en cadenas montañosas de Pangea: cinturón Famatiniano (Argentina), cinturón de Mozambique (Africa) y los Apalaches más antiguos. Nos revelan estas ofiolitas del Paleozoico inferior y del Precámbrico que, cuando se formó el supercontinente, se cerraron cuencas oceánicas. En los años sesenta, impresionado por la presencia de ofiolitas del Paleozoico inferior en los Apalaches de las provincias marítimas del Canadá, J. Tuzo Wilson se preguntó: "¿pudo el océano Atlántico abrirse, cerrarse y volver a abrirse?"

Para reconstruir las configuraciones continentales que precedieron a Pangea no podemos contar con la ayuda de los suelos oceánicos. Aunque la cuenca del Pacífico existía ya, el fondo oceánico de tal antigüedad hace tiempo que se hundió bajo los continentes que bordean la cuenca. No disponemos, pues, de un "mapa de ferrocarril" oceánico que señale la deriva continental antes de Pangea. Hemos de basarnos en los propios continentes, exactamente como hizo Wegener cuando intentaba reconstruir Pangea antes de la oceanografía moderna y la aparición de los satélites.

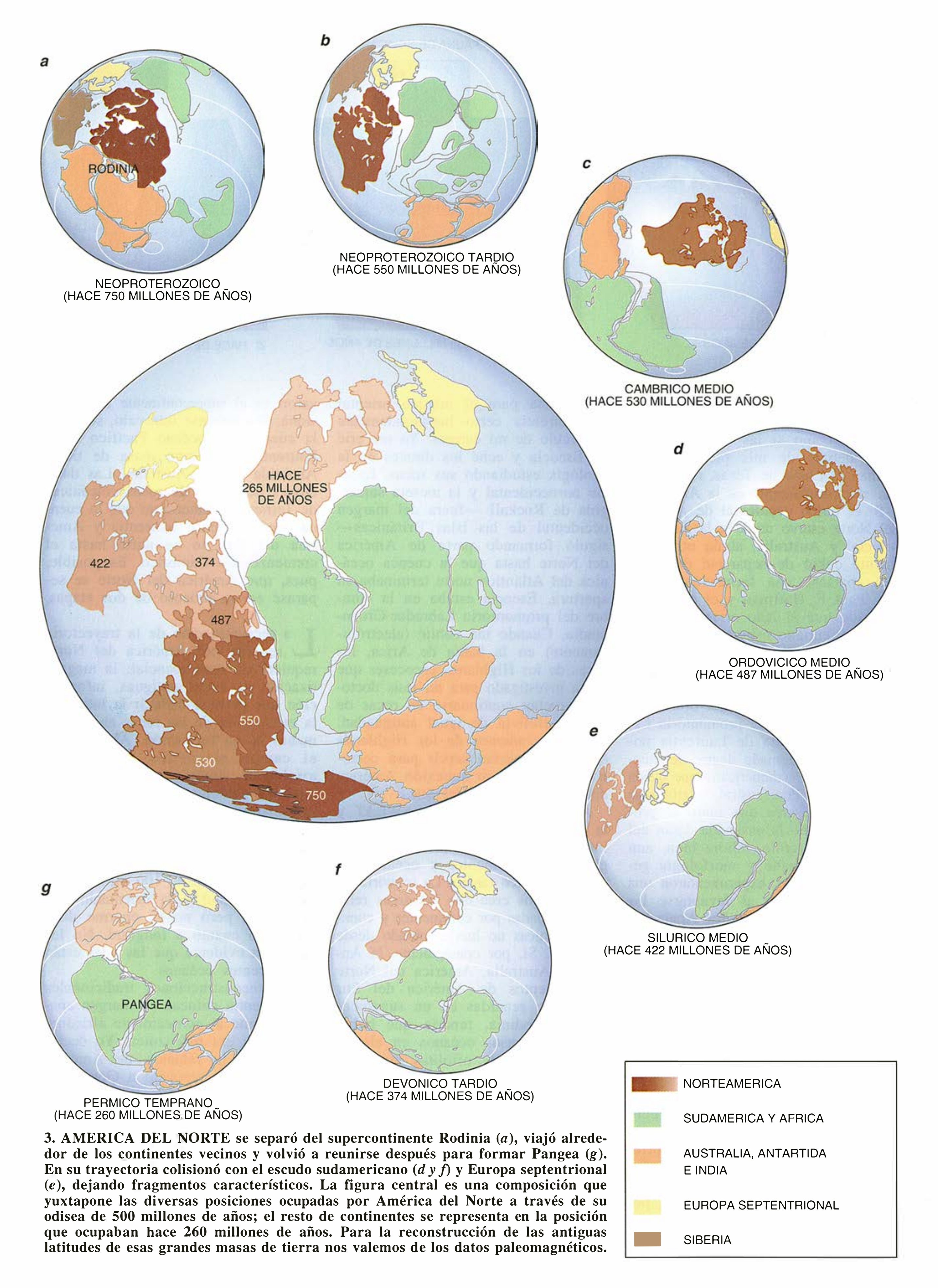
Dentro de Pangea hay algunos márgenes continentales antiguos sin contrapartidas evidentes. Los márgenes pacíficos de ambas Américas, la Antártida y Australia se formaron hacia finales del Precámbrico, hace entre 750 y 550 millones de años. El margen apalache de Laurentia —el antiguo escudo de Norteamérica— también se separó de otro continente con la apertura entonces de un rift. Desde que Wilson planteó su famosa pregunta, se ha venido suponiendo que el homólogo de ese margen era Europa occidental y el noroccidente de Africa. Pero no hay pruebas firmes de tal yuxtaposición.

En 1989 dirigí otra expedición a la Antártida, en el marco del Congreso Geológico Internacional. El objetivo del viaje era atraer la geología antártica, dominio privado de un grupo reducido de tenaces, hacia la corriente principal de la geología. Participaron expertos en los Himalayas, los Alpes europeos, los Apalaches, las Rocosas y otras regiones.

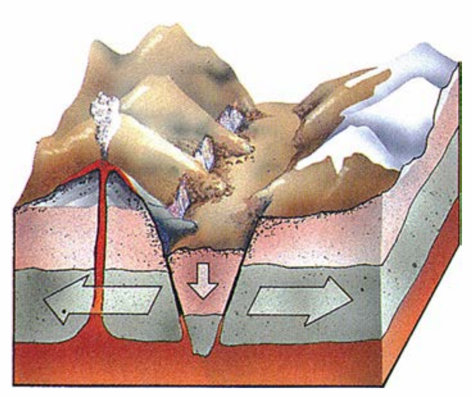
No mucho después, Eldridge M. Moores curioseaba en la biblioteca de la Universidad de California en Davis cuando se topó con un artículo de Richard T. Bell y Charles W. Jefferson. Atestiguaban éstos semejanzas entre los estratos precámbricos del oeste canadiense y el este australiano y postulaban la posible yuxtaposición entre los márgenes pacíficos de Canadá y Australia. Moores, que me había compañado en la mencionada expedición, comprendió que la hipótesis suponía también la yuxtaposición de los márgenes pacíficos de Estados Unidos y la Antártida, una idea similar a la que yo mantenía. Tras un breve rastreo bibliográfico, me mandó un mapa en el que destacaba el paralelismo estructural del interior de los escudos laurentiano y antártico oriental. "¿Me equivoco mucho?", preguntaba.

Las semejanzas en las estructuras internas de continentes desplazados pueden convertirse en pruebas convincentes de yuxtaposiciones anteriores. Moores prestó particular atención a un artículo donde se aludía a la existencia, a lo largo de las montañas Transantárticas —en sierra Shackleton, así llamada en honor del explorador Ernest Shackleton—, de rocas de edad y características parecidas a las localizadas debajo de buena parte de Nuevo México y Arizona. Observó también que en las proximidades de una playa antártica se habían encontrado rocas de unos mil millones de años de antigüedad, como las que caracterizan la provincia de Grenville, banda antigua de rocas que recorre el margen oriental y occidental de Norteamérica, desde Labrador hasta Texas. Llamó a su hipótesis —la idea de que los continentes habían estado yuxtapuestos— SWEAT, siglas en inglés de "sudoeste de Estados Unidos-este de la Antártida".

Ante la posibilidad de hallar por fin una respuesta a mi pregunta, reproduje la reconstrucción de Moores usando el programa PLACAS de nuestro instituto de Austin. El programa nos permite reunir fragmentos continentales y moverlos por el globo terrestre con precisión geométrica. Poco tiempo después, aclaraba, con Lisa M. Gahagan, algunas dudas sobre la armonización de límites: la escala y forma general de los dos márgenes hendidos antiguos eran compatibles. Además, el límite entre las rocas grenvillianas de Texas y las más antiguas de Arizona y Nueva México se proyectaba en la Antártida, exactamente en la zona donde sabía que había un límite similar bajo el hielo, entre sierra Shackleton y algunos diminutos aflo-

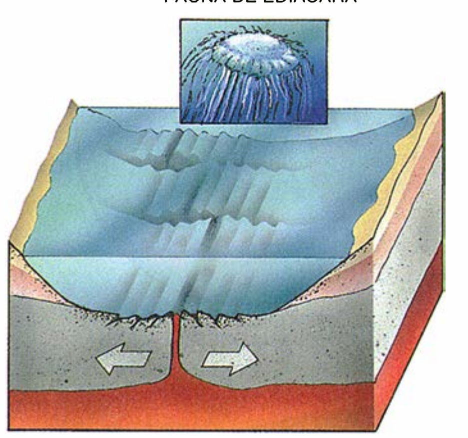


3. AMERICA DEL NORTE se separó del supercontinente Rodinia (*a*), viajó alrededor de los continentes vecinos y volvió a reunirse después para formar Pangea (*g*). En su trayectoria colisionó con el escudo sudamericano (*d y f*) y Europa septentrional (*e*), dejando fragmentos característicos. La figura central es una composición que yuxtapone las diversas posiciones ocupadas por América del Norte a través de su odisea de 500 millones de años; el resto de continentes se representa en la posición que ocupaban hace 260 millones de años. Para la reconstrucción de las antiguas latitudes de esas grandes masas de tierra nos valemos de los datos paleomagnéticos.

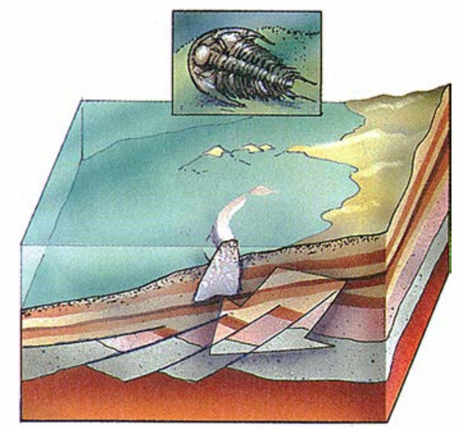


a HACE 750 MILLONES DE AÑOS

FAUNA DE EDIACARA


b HACE DE 750 A 550 MILLONES DE AÑOS

TRILOBITES


c HACE DE 540 A 500 MILLONES DE AÑOS

ramientos rocosos a lo largo de las costas heladas del mar de Weddell. ¡Parecía como si las rocas situadas justo debajo de mis pies, las que forman el Llano de Texas, reaparecieran electrónicamente en la Antártida!

Si el borde occidental de América del Norte estuvo unido a la Antártida oriental y Australia, algún otro continente debió de separarse del margen apalache con formación de un rift. Paul F. Hoffman y el autor han sugerido que el lado oriental del escudo laurentiano estuvo encajado en los escudos precámbricos de América del Sur, conocidos como Amazonía y Río de la Plata. Al manipular los tres escudos en la pantalla del ordenador se me ocurrió que el promontorio Labrador-Groenlandia de Laurentia podría haberse originado dentro del hueco del margen sudamericano que queda entre Chile y Perú austral, la ensenada de Arica. Se cree que tanto el promontorio como la ensenada datan del Precámbrico tardío. Ahora bien, aun cuando su tamaño y morfología general son iguales, experimentaron una gran modificación al levantarse las cadenas montañosas de los Apalaches y los Andes, de modo que no cabe esperar un ajuste geométrico preciso.

Mi sugerencia proporciona una posible explicación a un viejo enigma de la geología andina. A lo largo del margen peruano, por lo demás joven y activo, se encontraron rocas cristalinas de 1900 millones de años de antigüedad. Hardolph A. Wasteneys ha datado cristales de circón del macizo de Arequipa, en la costa del Perú austral. Demostró que esas rocas experimentaron una intensa metamorfosis cuando se formaron las montañas Grenville, hace de 1300 a 900 millones de años. Pueden representar, por tanto, una continuación de la provincia Grenville en América del Sur.

La hipótesis de una conexión sudamericana para el margen oriental de Laurentia cerró inesperadamente el círculo de mi carrera. Yo me crié en Escocia y eché los dientes en la geología estudiando sus rocas. Escocia noroccidental y la meseta sumergida de Rockall —fuera del margen occidental de las islas Británicas— siguió formando parte de América del Norte hasta que la cuenca oceánica del Atlántico norte terminaba su apertura. Escocia estaba en la cumbre del promontorio Labrador-Groenlandia. Cuando me cobijé (electrónicamente) en la bahía de Arica, las rocas de los Highlands escoceses que había investigado para mi tesis doctoral parecían continuarse en rocas de Perú y Bolivia de igual antigüedad. Los conocimientos de los Highlands escoceses podrían servir para corroborar una anterior conexión América del Norte-América del Sur.

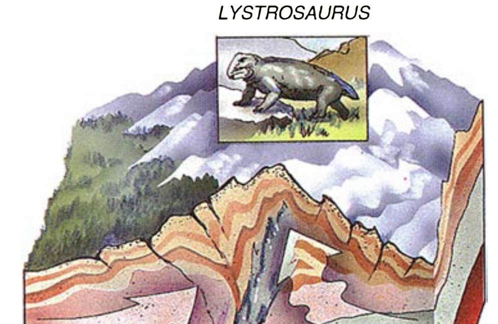
Aceptando la hipótesis SWEAT y la conexión panamericana, podemos intentar reconstruir la distribución global de continentes y océanos en el Precámbrico tardío. La mayoría de los geólogos cree que las áreas relativas ocupadas por continentes y cuencas oceánicas no han cambiado desde entonces. Si, por consiguiente, la Antártida, Australia, América del Norte y fragmentos de América del Sur estuvieron reunidas en un supercontinente, Rodinia, tendría que haber habido inmensos océanos en alguna parte. Restos de ofiolitas atrapadas en los continentes indican que esos océanos se hallaban entre India y el actual este africano (el océano de Mozambique) y entre Africa y Sudamérica (los océanos panafricano y brasileño, respectivamente).

Entre 750 y 550 millones de años atrás, esas cuencas oceánicas se destruyeron y todos los núcleos precámbricos de Africa, Australia, Antártida, América del Sur e India se congregaron en el supercontinente de Gondwana. Durante ese intervalo, se abrió la cuenca del océano Pacífico entre Laurentia y la gran masa de tierra Antártida oriental-Australia. Las dataciones isotópicas de rocas volcánicas de Terranova demuestran que la cuenca oceánica entre Laurentia y América del Sur no se abrió hasta el comienzo del Cámbrico. Es posible, pues, que América del Norte se separase en un proceso de dos etapas.

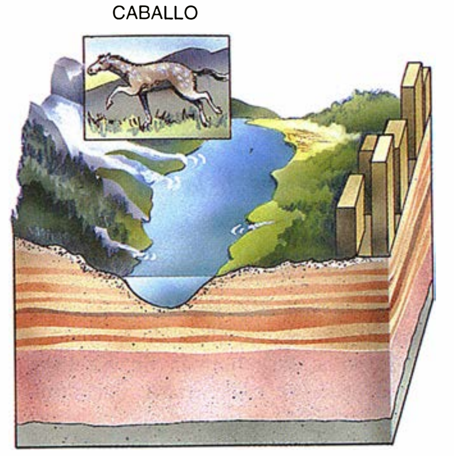
La reconstrucción de la trayectoria seguida por América del Norte requiere un dato esencial: la magnetización de rocas antiguas, información que permite deducir la latitud y la orientación de las rocas en el momento de su formación. Ahora bien, el campo magnético terrestre es axialmente simétrico; por tanto, las medidas paleomagnéticas no pueden informarnos de la longitud original donde se hallaban las rocas. Las lavas actuales de Islandia y Hawai, por ejemplo, revelarían, a quienes las estudiaran dentro de 100 millones de años, la latitud y la orientación de esas islas, pero no su enorme diferencia en cuanto a longitud. No les resultaría evidente que las islas están en diferentes océanos.

Las reconstrucciones tradicionales de Laurentia colocan su margen apalache frente al noroccidente africano, durante la era paleozoica. Yo decidí representar la relación de América del Norte con respecto a Gondwana de una forma distinta, aprovechando que la longitud del continente no está condicionada por los datos paleomagnéticos. Resultó que, durante el Paleozoico, América del Norte podría haber acabado su viaje alrededor de América del Sur, viaje que habría empezado cerca de la Antártida.

Cuando Luis H. Dalla Salda, Carlos A. Cingolani y Ricardo Varela,



d HACE 250 MILLONES DE AÑOS



e HACE 180 MILLONES DE AÑOS

4. LA DERIVA CONTINENTAL se refleja en los rasgos geológicos de cada era. A medida que se fragmentaba Rodinia (*a*), se fueron depositando las areniscas de la Formación Patuxent en la Antártida. Los glaciares cubrieron los hombros elevados del rift. Durante el Precámbrico tardío (*b*), el océano Pacífico se abrió por expansión del suelo oceánico. Simultáneamente se desarrolló una fauna de cuerpo blando. Llegado el Cámbrio (c), los océanos avanzaron sobre los continentes, habitados por trilobites, animales de cuerpo duro, y arqueociátidos formadores de corales. (*d*) En la época en la que se paseaban los tetrápodos, los continentes se reunieron en Pangea. Los océanos Atlántico e Indico se fueron abriendo conforme Pangea se fragmentaba (*e*) para dar paso al mundo actual.

de la Universidad de La Plata, vieron el bosquejo del recorrido, se emocionaron. Habían propuesto que un cinturón montañoso paleozoico, cuyas raíces se manifiestan en los Andes de Argentina septentrional, pudo haberse formado cuando otro continente colisionó con Gondwana. Además, el margen occidental de este cinturón Famatiniano contiene calizas del Cámbrico y del Ordovícico inferior (entre 545 y 490 millones de años de antigüedad) con trilobites característicos de América del Norte. Quizá, razonaron, ésta es una "tarjeta de presentación geológica" dejada cuando América del Norte colisionó con América del Sur durante el período Ordovícico, hace 450 millones de años.

Tras la apertura del rift que la separó de América del Sur, al final del Precámbrico, América del Norte se alejó bastante. Llegado el Cámbrico, con Gondwana atravesando una glaciación, América del Norte se hallaba en posición ecuatorial. A continuación, el fondo oceánico fue arrastrado por subducción debajo del cratón sudamericano, y las dos Américas volvieron a chocar durante el Ordovícico. Creemos que la parte más antigua de los montes Apalaches se continuaron alguna vez con el cinturón Famatiniano. Esta reconstrucción sitúa a Washington al lado de Lima, durante el Ordovícico medio.

Después de la colisión, los continentes volvieron a separarse, dejando según parece calizas norteamericanas, con sus característicos trilobites, en el noroccidente argentino. Esas rocas, idea que comparto con mis colegas argentinos, se desgajaron de la ensenada de Ouachita, antepasado del golfo de México. Bloques traídos a la superficie, desde el subsuelo de las calizas, por los volcanes andinos se han fechado recientemente en unos 1000 millones de años de antigüedad, edad que coincide con la de las rocas encontradas en la provincia Grenville, que probablemente ocuparon esta ensenada. Quizá los dos continentes americanos volvieron a encontrarse antes de que América del Norte terminara por colisionar con Africa noroccidental para completar Pangea. Al estudiar rocas sedimentarias paleozoicas de los Andes peruanos, algunos geólogos franceses han encontrado que están compuestas por restos procedentes de la erosión de una masa de tierra vecina. Supusieron que este continente, que ocuparía el área cubierta ahora por el océano Pacífico, habría sido una prolongación del macizo peruano de Arequipa.

Pudo tratarse, sin embargo, de Norteamérica. Como ha señalado Heinrich Bahlburg, la antigua fauna norteamericana de aguas cálidas se mezcla con fauna de aguas frías de Africa meridional y las islas Malvinas en los estratos noroccidentales sudamericanos de hace 400 millones de años (Devónico). Junto con una deformación a lo largo de la costa oriental de América del Norte, conocida como orogenia acádica, y el truncamiento de estructuras montañosas a lo largo del margen sudamericano, los datos disponibles señalan el choque de refilón de Laurentia contra el noroeste sudamericano durante el Devónico. Hay incluso calizas ordovícicas con trilobites sudamericanos —otra tarjeta de presentación— en Oaxaca. Sólo después de que América del Norte se alejara por fin del margen protoandino, comenzó a desarrollarse la cordillera andina actual.

Unos 150 millones de años más tarde, América del Norte volvió a encontrarse con Europa septentrional, Asia y Gondwana. De la colisión de esos continentes surgió Pangea, cuyos puntos de sutura eran los Urales, los Montes Armoricanos de Bélgica y Francia septentrional, las Ouachitas y los Apalaches más jóvenes. Después de una odisea de 500 millones de años América del Norte había recalado por fin en un lugar de descanso. Pero no por mucho tiempo. En el intervalo de otros 75 millones de años, a medida que Pangea se fragmentaba, se separó de Africa para dirigirse hacia su posición actual.

Durante el verano austral de 1993-1994, seis años después de mi primera visita a las montañas Pensacola, retorné a la Antártida. Esta vez, con mi colega Mark A. Helper, dos posgraduados y dos montañeros, exploré sierra Shackleton y Tierra de Coats, cerca del mar de Weddell. De acuerdo con mis modelos de ordenador, desde aquí se proyectaron las rocas del Grenville norteamericano, hace 750 millones de años. Los geólogos de la Antártida hace tiempo que vienen considerando anómalas estas áreas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DID THE BREAKOUT OF LAURENTIA TURN GONDWANALAND INSIDE-OUT? Paul F. Hoffman en *Science*, vol. 252, páginas 1409-1412; 7 de junio de 1991.

PACIFIC MARGINS OF LAURENTIA AND EAST ANTARCTICA-AUSTRALIA AS A CONJUGATE RIFT PAIR: EVIDENCE AND IMPLICATIONS FOR AN EOCAMBRIAN SUPERCONTINENT. I. W. D. Dalziel en *Geology*, vol. 19, n.º 6, págs. 598-601; junio, 1991.

ON THE ORGANIZATION OF AMERICAN PLATES IN THE NEOPROTEROZOIC AND THE BREAKOUT OF LAURENTIA. I. W. D. Dalziel en *GSA Today*, vol. 2, n.º 11, páginas 237-241; noviembre, 1992.

PALEOZOIC LAURENTIA-GONDWANA INTERACTION AND THE ORIGIN OF THE APPALACHIAN-ANDEAN MOUNTAIN SYSTEM. I. W. D. Dalziel, Luis H. Dalla Salda y Lisa M. Gahagan en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 106, n.º 2, páginas 243-252; febrero, 1994.

John Horgan

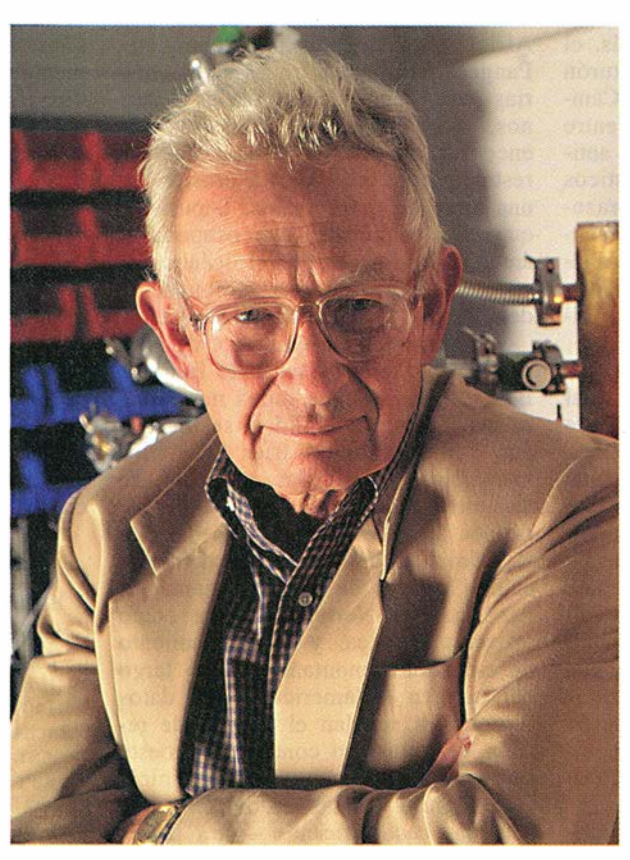
PHILIP W. ANDERSON: *El genio hosco de la física de la materia condensada*

La voz de Philip W. Anderson es profunda y pausada. Entre frase y frase se detiene para calcular la siguiente jugada. Su tono basal se arrastra inexpresivo. Pero al igual que algunas aleaciones exóticas en un estado inestable, su humor puede saltar en un instante de una condición a otra.

Anderson, teórico de la materia condensada en Princeton, acaba de volver de unas conferencias interdisciplinares celebradas en Colorado, y su cara se ilumina al relatar una sesión sobre la genética del cáncer. Se maravilla de la "increíble precisión de la reproducción que tiene que darse" para que las células no se vuelvan cancerosas. Los investigadores tendrán que descubrir "Dios sabe cuántos principios nuevos" para explicar este fenómeno.

Pero en ese momento frunce el ceño, recordando una "horrible" sesión sobre una de sus especialidades, los superconductores de alta temperatura. Descubiertos hace ocho años, estos materiales se resisten todavía a una sistematización teórica. Anderson acusa a sus colegas de "banales" y de "refugiarse bajo las farolas" en vez de aventurarse en lo desconocido para buscar la solución de los problemas. El premio Nobel, de 70 años, se lamenta de su relación con sus colegas: "A veces me veo como un blanco grande y lento", confiesa. "Por decirlo con un ribete de cinismo: a veces me parece que los jóvenes sólo sueñan con enterrar a un viejo prestigioso. Aunque admito que no medrarían mucho si se limitaran a demostrar que yo estaba en lo cierto."

Anderson es un blanco grande, pero no lento. En algunos aspectos constituye el líder ideal de la física americana tras la suspensión del Supercolisionador Superconductor. Por su habilidad innata para intuir el significado de los experimentos, ha sentado cátedra en la física de la materia condensada durante más de 40 años. Es un ardiente proselitista, que compara la vida con la interacción entre el orden y el desorden que se encuentra en los sistemas de materia condensada. Anderson también comenzó a cuestionar la hegemonía de la física de partículas y del paradigma del reduccionismo total de la ciencia moderna antes de que esos temas se pusieran de moda. Su artículo de 1972 "More is different" sigue siendo un grito penetrante en favor de los planteamientos antirreduccionistas de la ciencia, en particular de la teoría del caos y de los estudios sobre la complejidad.



ANDERSON fue uno de los primeros adalides del antirreduccionismo

Los que hayan leído los ensayos de Anderson en *Physics Today* y en otras publicaciones saben que puede ser un genio hosco. Se quejó hace cuatro años de que los científicos jóvenes "parecen no darse cuenta de que la posesión de un doctorado nunca garantizó una carrera investigadora; ésta es y debe ser el privilegio de una reducida élite". También despotrica contra algunos físicos, entre ellos un colega de Princeton, por cuantificar fenómenos psíquicos.

Anderson insiste en que nunca pretende levantar un revuelo. "Llamo a las cosas por su nombre", se defiende. Reconoce que puede parecer "excesivamente dogmático y autoritario". Idea que le desazona. "He sido rebelde muchas veces."

El espíritu de contradicción de Anderson salió a relucir mientras preparaba su doctorado en Harvard, al término de la Segunda Guerra Mundial. Otros estudiantes acudían en tropel a las clases de Julian Schwinger, cuya teoría cuántica del electromagnetismo consituye un hito en la física de partículas. A Anderson le repelía el estilo excesivamente abstracto de Schwinger —y su popularidad. "Había una tremenda excitación y arremolinamiento de gente a su alrededor; a mí eso no me gustaba", confiesa.

Escogió otros campos que le parecieron de mayor interés práctico. Entró en los Laboratorios Bell, cuyos investigadores "sacaban varios codos al resto de la industria". No es de los que deploran los recortes presupuestarios para investigación básica provocados por la mala racha de esa compañía telefónica privada. En los últimos veinte años, arguye, esa investigación se había "multiplicado como la peste" y la realizaba "gente sin el mismo nivel de competencia" que en los años cincuenta.

En los Laboratorios Bell se estimulaba a los teóricos como Anderson a que trabajaran con los físicos experimentales. En esa época, su com-

pañero, George Feher, descubrió que si las impurezas de un semiconductor alcanzaban cierta densidad, de repente se convertían en barreras para la conducción de electrones. Los resultados no concordaban con las teorías de entonces, por lo que muchos teóricos hicieron caso omiso de ellos. Pero no Anderson. El demostró que esos resultados podían ser una propiedad genérica de las redes cuyos átomos están ordenados al azar.

Los experimentales encontraron después que la llamada teoría de la localización de Anderson podía explicar algunos efectos, no sólo en materia condensada sino también en los plasmas y en la radiación electromagnética confinada. Por este trabajo sobre la localización acabaron concediéndole el premio Nobel en 1977, compartido con John H. Van Vleck, su tutor de Harvard, y Sir Nevill F. Mott, de la Universidad de Cambridge, con quienes Anderson había colaborado.

Siguió adelante y demostró cómo la resonancia magnética, el ferromagnetismo, la superfluidez y otros capítulos de la materia condensada hallaban justificación en el marco de la rotura de la simetría. Así, un cristal líquido, compuesto de moléculas que se comportan a la manera de imanes minúsculos, posee una simetría máxima cuando sus moléculas están orientadas al azar. La simetría "se rompe", reemplazada por otra nueva, más restringida, cuando se le aplica al cristal una corriente eléctrica, que provoca que las moléculas se orienten en la misma dirección.

Anderson comenzó a exponer estas ideas durante un seminario en Cambridge, a principios de los sesenta. Inspiró a uno de sus estudiantes, Brian D. Josephson, quien propuso que los electrones de un circuito superconductor podrían atravesar por un "túnel" una barrera de potencial. Anderson y un colega de los Laboratorios Bell comprobaron experimentalmente las predicciones de Josephson, y en 1973 éste recibió el premio Nobel por su descubrimiento, conocido ahora como efecto Josephson.

También los físicos de partículas se han aprovechado de las ideas de Anderson. A mediados de los sesenta Peter W. Higgs sugirió que un mecanismo de rotura de la simetría similar al propuesto por Anderson podría haber sido la causa de que las partículas adquirieran masa, cuando el universo era aún muy joven y caliente. La caza del bosón de Higgs, la partícula que presuntamente provoca la rotura de la simetría, llegó a ser la más costosa de la física de partículas; era la razón de ser del SSC.

A pesar de su colaboración en ese campo, hace tiempo que Anderson estaba molesto por la arrogancia de los físicos de partículas. A finales de los años sesenta, recuerda, "los físicos de partículas se vanagloriaban por todas partes de que ellos estaban haciendo la ciencia fundamental, mientras que lo que hacíamos el resto era ingeniería". Anderson desafió ese enfoque en su artículo "More is different", señalando que la realidad posee una estructura jerárquica, los niveles de la cual son independientes, hasta cierto punto, de los niveles inferiores y superiores. "En cada circunstancia son necesarias nuevas leyes, conceptos y generalizaciones, que requieren una inspiración y creatividad tan grandes como en las etapas anteriores", sostiene. "La psicología no es biología aplicada, ni la biología es química aplicada."

"Nunca se entiende todo. Cuando uno lo entiende todo, es que se ha vuelto loco".

A raíz de ese ensayo, le llovieron invitaciones a foros muy diversos. A finales de los sesenta asistió a una reunión sobre neurofisiología, en la que expuso cómo la rotura de la simetría podría arrojar alguna luz sobre los procesos mentales. Entre sus compañeros en la mesa del congreso se contaban una autoridad en drogas psicodélicas y experiencias pseudoreligiosas y un marxista que predicaba una física de la evolución social.

Frente a las pretensiones de los físicos de partículas, sostuvo que con el SSC no se iban a dilucidar cuestiones de extremada importancia, ni resultaría en nada de valor práctico. "Me limité a decir cosas que son verdades manifiestas", es el seco resumen de Anderson. "Siento mucho que el Congreso les permitiera seguir durante tanto tiempo." No le importa que más de un físico de partículas le haya retirado la palabra.

Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, sugiere en *The Quark and the Jaguar*, un libro publicado en 1994, que Anderson habría apoyado el SSC si los teóricos hubieran denominado al motivo de su búsqueda bosón de Anderson-Higgs. Al preguntarle sobre tal acusación, frunce el ceño y se limita a responder: "No me gustó ese comentario." Pero luego se quita la espina y afirma que el libro de Gell-Mann contiene una explicación "muy insatisfactoria" de cómo las leyes relativamente simples de la física generan tanta complejidad. El problema de Gell-Mann, afirma, es que "ha estado demasiado tiempo alejado del tejemaneje real de la física".

Ambos, Anderson y Gell-Mann, han empeñado su prestigio en el Instituto Santa Fe, de Nuevo México, que es un centro de estudios sobre la complejidad. Aunque Anderson lo ha promocionado en sus escritos, no es un ferviente entusiasta de los intentos de algunos investigadores de allí que quieren formarse una idea sobre la naturaleza a partir de las simulaciones por ordenador. "Como entiendo algo de modelos económicos globales, sé que no funcionan." Añade: "Me pregunto si los modelos climáticos globales y los modelos de circulación oceánica o cosas como ésas no estarán tan llenos de estadísticas y mediciones amañadas."

Anderson todavía enseña en Princeton, en cuyo claustro docente ingresó en 1975. (Se retiró de los Laboratorios Bell en 1984.) La enseñanza de la física de la materia condensada representa un reto especial, recalca, un reto que por lo general no es muy bien acogido. La mayoría de los cursos de física de la materia condensada hacen que suene "casi tan mal como química, sólo un fenómeno tras otro". Anderson ha procurado hacer de la rotura de la simetría una melodía de fondo unificadora.

En 1993 dictó un curso sobre "orígenes y comienzos", donde se adentró en cuestiones últimas de cosmología y biología. La fe de Anderson en que la ciencia pueda responder a esas cuestiones parece atemperada por un escepticismo aún mayor. Recibe con desconfianza las aspiraciones de algunos científicos —entre los que están eminencias del Instituto Santa Fe— de que la ciencia llegue un día a una "teoría de todo".

Ciertamente, hay muchos principios y mecanismos científicos cuya aplicabilidad es muy amplia, como la evolución en biología o la rotura de la simetría en física. "Pero no se debe caer en la tentación de creer que un principio que funciona bien a un nivel sirva también en los demás", declara. Cambiando abruptamente de tono, levanta las manos y grita: "¡Por fin veo la luz! ¡Lo entiendo todo!" Con una sonrisa amarga, baja las manos de nuevo. "Nunca se entiende todo. Cuando uno lo entiende todo, es que se ha vuelto loco".

Ciencia y sociedad

Los tratados sobre el ambiente

Puesta en práctica

Para quien se guíe por leyes internacionales, nuestro entorno está a salvo. Existen unos 170 tratados, la mayoría de ellos firmados en los últimos 20 años, para defender la vida sobre el planeta en todos sus aspectos. Tierra, mar y aire, con sus miríadas de organismos, están protegidos de residuos peligrosos, deforestación, sobrepesca, sobrecaza y cuantas amenazas pudieran atentar contra su integridad.

Un mundo perfecto... sobre el papel. La debilidad intrínseca que caracteriza a las normas de ámbito internacional convierten, muchas veces, los acuerdos en papel mojado. Siendo improbable una revisión a fondo de las relaciones intergubernamentales (en particular, del *modus operandi* de las Naciones Unidas), muchos negociadores se han esforzado en idear soluciones que lleven al cumplimiento de tales tratados.

En la falta de eficacia de los acuerdos sobre el ambiente habría que atribuir mayor responsabilidad a la rémora de la tradición que a la ausencia de unanimidad en las decisiones internacionales. Los textos definitivos de los tratados suelen satisfacer a los países más remisos. Fue el caso, por ejemplo, de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) celebrada en Río de Janeiro en junio de 1992, donde más de 100 gobiernos se pusieron de acuerdo sobre el papel para hacer frente al cambio climático. Pero, ante la insistencia de los Estados Unidos, los negociadores reelaboraron el documento inicial en el sentido de que éste sólo urgiera (y no exigiera) a los países que estabilizaran sus emisiones de dióxido de carbono en los niveles de 1990 para el año 2000.

Para que la minoría reacia no frustre las buenas intenciones de la mayoría, algunos tratados se someten a mecanismos de votación innovadores. Así, cuando no se puede alcanzar un consenso, permiten que una mayoría cualificada incorpore medidas más restrictivas. Con frecuencia, ni siquiera se precisa ratificar la enmienda. Todos los miembros están por ley obligados a ella, a menos que formulen de manera expresa su discrepancia; pese a ello, hay casos en que se les veda a los países objetantes la opción de retirarse.

El Protocolo de Montreal, establecido en 1987 para frenar la acción destructora de los halocarburos (CFC) sobre la capa de ozono, incluye cláusulas que se rigen por tales reglas. El acuerdo permite que dos tercios de las 140 naciones participantes voten para incorporar al protocolo controles más severos. En 1990 se reforzó el acuerdo con la prohibición, extendida a todos los países firmantes, de la producción de CFC.

La prohibición absoluta y tajante, que respondía a la aparición de nuevos datos científicos sobre la tasa de merma del ozono, sustituía la exigencia original del protocolo que reducía a la mitad la producción de CFC. Dos años después, la fecha tope para ese objetivo se adelantó del año 2000 hasta el 1 de enero de 1996. En ambas modificaciones hubo consenso. Pero no cabe duda de que la situación de minoría de los países más remisos, convencidos de perder la votación, influyó mucho en las decisiones finales acordadas.

No es fácil alcanzar así acuerdos de cierto calado. Menos, sin embargo, que vigilar y exigir su cumplimiento. La mayoría de los tratados internacionales no prevén sanciones; los que las prevén, casi nunca las imponen. Pero empiezan a asomar otros métodos más sencillos que, como la presión por iguales, resultan poderosas herramientas de coacción. Algunos tratados reclaman que las naciones informen sobre las medidas tomadas para cumplir lo pactado y los resultados obtenidos con dichas medidas. Las organizaciones no gubernamentales (ONG) pueden apoyarse en esa información para pública denuncia de gobiernos remolones. Peter M. Haas, politólogo de la Universidad de Massachusetts en Amherst, observó que la asociación ecologista Greenpeace utilizó esos datos para sacar a la luz pública los vertidos de cenizas de carbón que Inglaterra realizó en el mar del Norte en enero de 1960, una violación del espíritu (si no de la letra) del Convenio de Oslo de 1972 sobre vertidos oceánicos.

Persuasión moral y escarnio público aparte, los incentivos comerciales tienen peso para asegurar el cumplimiento. Así, los firmantes del Protocolo de Montreal tienen prohibido adquirir, de países no firmantes, halocarburos o productos que los contengan. Bastaron disposiciones de ese tenor para que se adhirieran un centenar largo de países díscolos.

Pese a todo, las reglas internacionales del comercio amenazan con frustrar tales restricciones económicas. En octubre de 1991, y de nuevo en mayo de 1994, ciertos dictámenes emitidos por el Acuerdo General sobre Tarifas y Comercio (GATT) llegaban a la conclusión de que determinadas disposiciones de la Ley norteamericana de Protección de los Mamíferos Marinos violaban el GATT; en concreto, el embargo de la importación de atún procedente de México, cuyos pescadores mataban muchos delfines atrapados en sus redes. La resolución establece un precedente peligroso: si el GATT puede levantar las barreras comerciales en el trato con naciones agresoras contra el medio, se pierden las armas capaces de obligarles a un cambio de proceder.

Una opción alternativa a las que se acaban de describir la tenemos en las "leyes blandas", declaraciones que provocan a veces una acción más rápida que los acuerdos duros y vinculantes. Se da la paradoja de que los países, al no sentirse obligados por ley a aceptar tales compromisos, se muestran más dispuestos a colaborar. Organismos internacionales, naciones simpatizantes y organizaciones no gubernamentales pueden propiciar el cumplimiento de leyes blandas respaldando económicamente decisiones y campañas públicas. Las leyes blandas tienden a establecer determinadas expectativas (o a crear un estado de opinión mundial) que constituirán, luego, la base de acuerdos más permanentes.

La Agenda 21, un documento de más de 500 páginas sobre el desarrollo viable, que surgió de la Conferencia de Río, es un ejemplo de ello. Ofrece recomendaciones políticas sobre lucha contra la pobreza y provisión de agua limpia en todo el globo, entre otros problemas imponentes. Tales objetivos utópicos desafían los recursos técnicos y financieros de



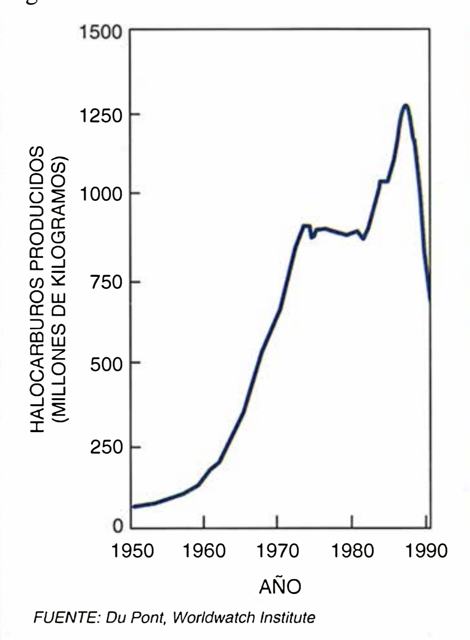
Garras, cráneos, dientes y cuernos procedentes de especies amenazadas, entre ellas tigres y osos, que se venden en el mercado de Taichilek, en Birmania. Al otro lado de la frontera, en Tailandia, este tráfico, ilegal, recibe un castigo severísimo. Las autoridades tailandesas endurecieron las leyes penales en 1991, después de que el Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies en Peligro (CITES) prohibiera la compra de productos de animales salvajes procedentes de este país

Control de los halocarburos

En cumplimiento del Protocolo de Montreal, el consumo global de halocarburos (CFC), destructores del ozono, se redujo de 1300 millones de kilogramos en 1988 a unos 510 millones de kilogramos en 1993 *(gráfico de la izquierda)*. Para afianzar dicha tendencia, el tratado ha prohibido el uso de CFC en los países industrializados a partir del 1 de enero de 1996. Muchos científicos están investigando alternativas menos perjudiciales. La termoacústica, una técnica que utiliza sonidos para producir enfriamiento, puede convertirse en sustituto de los CFC empleados en refrigeración. La fotografía *(derecha)* muestra a Steven Garrett con su prototipo de un sistema de refrigeración termoacústico.

Ciertos sustitutos químicos, entre ellos los hidrohalocarburos, resultan asimismo prometedores. Al no contener cloro, estas sustancias no dañan la capa de ozono. Pero pueden devenir gases de invernadero, lo mismo que los CFC.

Los signatarios del protocolo establecieron en 1990 un fondo de 240 millones de dólares para implantar en el Tercer Mundo prácticas alternativas a los CFC antes del año 2006. Dos años después se comprometieron otros 510 millones de dólares. Hasta la fecha, sólo se han recaudado 226 millones. Aun así, si el tratado no hubiera proporcionado este dinero, es muy probable que ni la India ni China se hubieran adherido, continuando así su empleo progresivo de CFC.



FUENTE: Du Pont, Worldwatch Institute



muchas naciones, pero existe la esperanza de que constituyan un aldabonazo en las puertas de gobiernos nacionales y entes internacionales, para que realicen cambios drásticos en sus políticas. Superan el centenar la cifra de naciones que han establecido comisiones sobre desarrollo viable, dispuestas a llevar a la práctica la Agenda 21. La ONU ha formado una Comisión sobre el Desarrollo Viable encargada de supervisar la puesta en marcha de los acuerdos de Río.

La Agenda 21 también promueve la labor de movimientos ciudadanos, confederaciones empresariales y otras ONG. Al no caer en la retórica de la diplomacia, estos grupos explican con llaneza y claridad los fracasos en el cumplimiento y en las negociaciones. Suelen disponer, además, de acceso a información crucial que los gobiernos pasan por alto o no tienen. De ahí su importancia creciente en las reuniones internacionales sobre la situación de nuestro planeta. Considerando el relieve de las aportaciones de las ONG a la Conferencia de Río, la nueva Comisión sobre el Desarrollo Viable ha acreditado a más de 500 organizaciones para que participen en las actividades que emprenda.

Blando o duro, no importa, los países del Tercer Mundo suelen verse impotentes para ejecutar un acuerdo firmado. Rectificar este desequilibrio dependerá, en buena medida, de que se les aporte asistencia técnica y financiera, así como del recto uso de los fondos asignados.

Como medida previa, la comunidad internacional necesita abrir mejores cauces para recibir y dispensar dicha ayuda. La secretaría de la CNUMAD estimó en 1992 que los países en desarrollo necesitarían 125.000 millones de dólares anuales para poner en práctica la Agenda 21, más del doble de la cantidad que les llega como ayuda para el desarrollo. En Río, los países industrializados prometieron conceder la máxima prioridad a los objetivos de la Agenda 21 cuando elaborasen la partida habitual destinada a la ayuda en sus presupuestos, pero ofrecieron muy poca financiación adicional.

Para encauzar la ayuda reservada a la protección global del entorno, los signatarios de Río apostaron por la ampliación del Servicio del Ambiente Global (GEF), institución creada en 1990 a modo de proyecto piloto y sometida a la gestión conjunta del Banco Mundial, el Programa Ambiental de la ONU y el Programa de Desarrollo de la ONU. El GEF pasó así a ser considerado un mecanismo de financiación provisional para el convenio del clima y el tratado sobre protección de la diversidad biológica que se forjaron en Río. En marzo de 1994 los gobiernos acordaron que el GEF fuera permanente, con una asignación de 2000 millones de dólares a lo largo de los tres años siguientes.

A pesar de todo, el GEF no está exento de controversia. Países del Tercer Mundo y las ONG recelan de su estrecha asociación con el Banco Mundial. Las ONG mantienen que

este último ha ignorado durante mucho tiempo a las comunidades locales en sus grandes proyectos de desarrollo. Por su lado, los países atrasados se sienten agraviados con la distribución del poder del voto en el seno del banco, que se reparte según la contribución monetaria. Con la esperanza de corregir tales deficiencias, el acuerdo de marzo de 1994 alteró el reglamento administrativo del Servicio al objeto de que gozara en adelante de una mayor independencia del Banco Mundial. El sistema de votación del GEF concede ahora un mayor peso a los países receptores. Gracias a esa gavilla de reformas, es probable que los miembros de los convenios sobre la biodiversidad y el clima acepten el GEF como su brazo financiero permanente.

Prácticas de financiación, leyes blandas, incentivos comerciales, presión por iguales y votación por mayoría podrían rendir muchísimo más si los gobiernos aceptaran una autoridad internacional encargada de negociar y de poner en obra los tratados. Podría cederse esa labor al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente o la Comisión para el Desarrollo Viable, o incluso erigirse un nuevo organismo. Una autoridad central podría promover la cooperación constructiva entre diferentes tratados que comparten objetivos similares y facilitar la activa participación de las ONG en las negociaciones, beneficios que el proceso actual dificulta.

Lo cierto es que la burocracia creada para diseñar y poner en práctica los tratados internacionales se reparte en una maraña de oficinas de la ONU y de comités ambientales gubernamentales dispersos por todo el planeta. La Asamblea General erige un comité internacional (así el Comité Negociador Internacional sobre el Cambio Climático) cada vez que se presenta un acuerdo importante para su discusión. Los resultados se transmiten luego, para su administración, a otras instituciones. Un grupo de miembros del tratado, la Conferencia de los Partidos, se reúne periódicamente y supervisa la puesta en práctica de sus acuerdos. Un "comité de puesta en marcha", más reducido, suele informar a este grupo.

Las secretarías proporcionan un soporte crucial a estos grupos gubernamentales, pero ven obstaculizada su tarea con una financiación y un equipo insuficientes. Por mor de ejemplo, la secretaría del Protocolo de Montreal consta de sólo cinco personas y tiene un presupuesto de 2,5 millones de dólares, menos del 1 por ciento de la cantidad total asignada a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para su apartado de calidad del aire. En algunos casos, la dispersión puede favorecer el éxito, ya que las oficinas pequeñas se ocupan de tareas específicas mejor que los entes mastodónticos; pero lo normal es que semejante tinglado administrativo (o en el otro extremo la ausencia de infraestructura) conduzca al derroche y a los retrasos.

Mientras las naciones sopesan distintas maneras de consolidar y robustecer el sistema vigente, podrían ir incorporando estrategias procedentes de otros campos de las relaciones internacionales. La Organización Internacional del Trabajo ofrece un modelo válido, al constituir un foro en el que los participantes pueden negociar normas internacionales, por ejemplo sobre seguridad laboral, y revisa el cumplimiento de dichas normas por los distintos estados. Además, su estructura de gobierno tripartita, insólita, concede una posición paritaria a los representantes de los empresarios, los gobiernos y los sindicatos.

No es tarea fácil establecer tratados y crear instituciones internacionales que posean fuerza suficiente para invertir la tendencia inexorable de la degradación ambiental del planeta. Para conseguirlo, las naciones soberanas deben superar su rechazo tradicional a ceder poder a las organizaciones internacionales, y éstas, a su vez, tienen que abrir las puertas a organismos no gubernamentales. Pero, a la postre, es del interés de todos los países dar estos pasos, pues anda en juego nada menos que la habitabilidad del planeta. Si en el mundo no hay ya fronteras para la técnica, la contaminación, el comercio y los viajes, tampoco debiéramos levantarlas para la erección de un gobierno internacional.

HILARY F. FRENCH
Instituto Worldwatch

Arte neolítico

Venus de Gavà

Las excavaciones arqueológicas que, desde 1991, el Museo de Gavà realiza en el yacimiento arqueológico de las Minas Prehistóricas de Gavà (en las proximidades de Barcelona), enmarcadas dentro de un proyecto integral de actuación que contempla su investigación, conservación y difusión, se han visto recompensadas con el hallazgo, en mayo del año pasado, de una figura femenina, la Venus de Gavà. Hasta ahora, la más completa, de mejor calidad y mayor detalle de la Europa occidental.

El yacimiento arqueológico está situado al norte del macizo del Garraf, en su vertiente marítima. Se trata de las minas subterráneas en galería más antiguas de Europa. Explotadas durante el Neolítico, de ellas se extraían ópalo y sílex, para tallar diversos instrumentos, y variscita, para fabricar objetos de adorno corporal (perlas de collares y pulseras). La Venus se descubrió en la mina número 16, dentro del relleno de su pozo, que sirvió de basurero durante el Neolítico, una vez terminada la explotación. Apareció rota en varios fragmentos, repartidos entre diferentes niveles del relleno. Hubo, pues, que restaurarla antes de acometer su estudio y mostrarla en exposición.

Es una figurita de cerámica, de muy buena calidad, cuyas paredes presentan un acabado bruñido y una coloración oscura, casi negra. La parte conservada mide 16 cm de alto y 11 de ancho. Muestra la cara, el tórax y la parte superior del abdomen de un personaje femenino, del que con dos procedimientos decorativos distintos se representan los adornos y rasgos corporales. En relieve, aparecen la nariz, las extremidades superiores y los ojos; esgrafiados, los ornamentos del cuerpo, el vestuario y las cejas. El esgrafiado se complementó con la incrustación de pasta blanca en el interior de las líneas del mismo.

De la cara se realizaron sólo los ojos y la nariz, obviándose la boca. La nariz, alargada y estrecha, ofrece un perfil estilizado. Los ojos, circulares, se representan por una pastilla en relieve poco resaltado, rodeada por una serie de rayos grabados (pestañas), formando en conjunto lo que parece un diseño de simbología solar. Por debajo de la cara se distingue un motivo esgrafiado, un collar quizá; consta de varias líneas rectas: una horizontal, de la que cuelgan otras diecisiete, verticales y paralelas, más cortas que la primera. Volvemos a encontrar este motivo en figuras neolíticas del norte de Italia, coincidencia que nos lleva a pensar en que pueda tratarse de un ideomorfo cuyo significado desconocemos.

Sobre el tórax se representan en relieve circular poco abultado los dos pechos. Las extremidades superiores, pegadas al cuerpo, tienen los codos flexionados en ángulo recto; las manos, con los dedos estirados y juntos, descansan planas sobre el vientre. En las dos extremidades se ilustran lo que parecen pulseras, agrupadas en la parte inferior de cada antebrazo y en la superior del brazo.



Venus de Gavà (Estudio de Fotografía Martín García)

De la zona abdominal se conserva solamente la parte superior, que está abultada, como si se tratara de un embarazo. En el centro se observa grabado el extremo de una espiga en posición vertical invertida. Líneas horizontales y paralelas también esgrafiadas a cada lado representan presumiblemente el vestido (falda), que no cubriría la parte superior del cuerpo.

En función de las características técnicas y morfológicas de la pieza y de otros materiales procedentes del mismo relleno (acabado bruñido de la superficie, decoración esgrafiada), la talla puede situarse en el Neolítico medio; período que, según las dataciones por radiocarbono del yacimiento de las minas de Gavà, transcurriría entre el 4000 y el 3300 antes de Cristo. Con el fin de valorar y comprender el significado de la Venus hemos recopilado un primer corpus de figuras antropomorfas del Neolítico del Mediterráneo. Hemos llegado a la conclusión de que, si bien en España, Francia e Italia se han encontrado figuras humanas, son las halladas en el sudeste de Europa las que, a pesar de la distancia que las separa, presentan un mayor parecido material, técnico, morfológico y decorativo con la de Gavà; en particular, las del grupo de las "diosas preñadas de la vegetación", reconocido por M. Gimbutas en la zona de los Balcanes. Se manifiesta la representación naturalista de una mujer embarazada, entronizada o sentada, con las manos descansando sobre el regazo, y son sus mejores ejemplos las damas de Kökénydomb (SE de Hungría) y de Pazardzik (Bulgaria central).

No cabe duda sobre el carácter femenino de la pieza: pechos, abdomen abultado y posible representación del sexo en forma de espiga invertida. El descubrimiento de figuritas femeninas, embarazadas o con los caracteres sexuales acentuados, relativamente similares en lugares distantes, ha dado pie a sustentar la tesis de una religión neolítica, de alcance universal, basada en el culto a la diosa madre y a la fecundidad. Pero no hay que olvidar que, aunque fue éste, junto con el de los muertos, uno de los principales cultos del Neolítico, los rituales pudieron abarcar otros muchos aspectos y diferir de unas sociedades a otras, sin que esté demostrada la primacía de la diosa madre. Por otro lado, un mismo objeto u objetos similares pudieron tener significados diferentes. Con todo, en el caso de la Venus de Gavà el estrecho parecido con las citadas diosas preñadas de la vegetación hace muy probable su vinculación a cultos a la fertilidad de la tierra, que quizá haya que entender no únicamente en su sentido agrícola sino también mineral. Su hallazgo en el interior de una mina y correspondiendo a una comunidad de mineros lo sugiere.

JOSEP BOSCH Y ALÍCIA ESTRADA
Museo de Gavà

Observatorios astronómicos

Protección luminosa y radioeléctrica

La protección de nuestro cielo no corresponde sólo a los astrónomos, sino también a la población entera, que ha visto cómo en los últimos años el cielo nocturno ha incrementado su brillo de forma alarmante.

De entre los posibles factores ambientales que afectan el cielo nocturno, destacan la contaminación lumínica, la contaminación atmosférica, las emisiones radioeléctricas y el tráfico rodado. La contaminación lumínica se produce por el uso de una iluminación exterior inadecuada, tanto por el tipo de lámparas utilizadas como por su colocación y horario. La contaminación atmosférica, principalmente humos y polvo, atenta contra la claridad del cielo nocturno (o lo que es lo mismo, causa la extinción atmosférica), en algunos casos con una fuerte componente de color y aumento de la luz difusa. Además, el polvo puede ensuciar la óptica de los telescopios y dañar sus mecanismos de precisión.

El empleo de focos emisores de frecuencias electromagnéticas elevadas degrada el espacio observacional, dada la presencia de detectores ultrasensibles y, en particular, de radiotelescopios. Por último, el tráfico rodado contribuye a aumentar la contaminación lumínica y atmosférica y puede, además, en el caso de tráfico pesado, producir vibraciones que alteran el funcionamiento de los telescopios.

El rápido aumento experimentado en la iluminación exterior en la mayoría de las áreas urbanas, a lo largo de los últimos, años ha elevado la contaminación lumínica hasta niveles que pueden afectar seriamente a los observatorios. Este aumento del brillo del cielo nocturno impide la observación de nuestro cielo por los

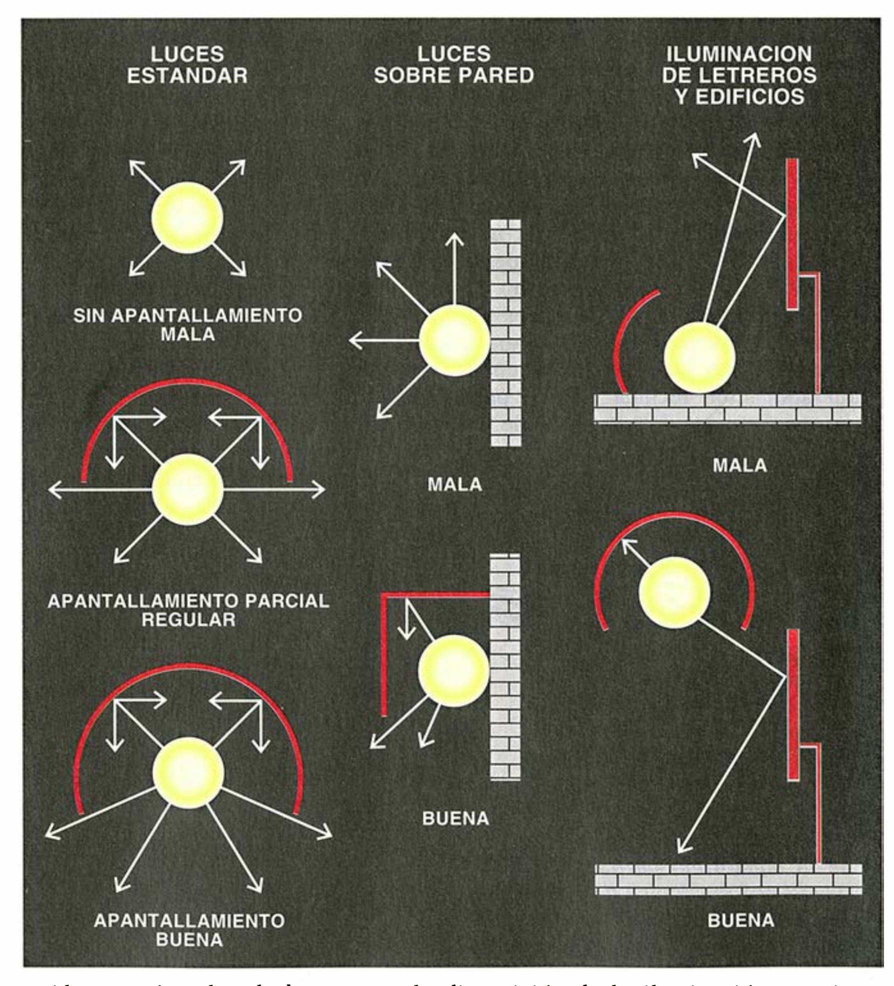
habitantes de urbes, incluso pequeñas. El paulatino deterioro de la calidad astronómica en los alrededores de los observatorios ya motivó en los años ochenta la elaboración de una serie de recomendaciones por parte de la Unión Astronómica Internacional (UAI) para preservar la calidad del cielo y los intereses científicos de la astronomía.

La excepcional calidad del cielo de España para la observación astronómica, y en especial el de algunas zonas de las islas Canarias y del sureste de la península, motivó la instalación, en estas regiones, de los mayores complejos astronómicos europeos del hemisferio Norte. Conscientes de este enorme recurso, debemos protegerlo, por el bien de la ciencia y reserva para las futuras generaciones. La legislación española constituye una de las más avanzadas en el plano internacional: se ha dictado una ley sobre protección de la calidad astronómica de los observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias, el Estado se ha comprometido, mediante sendos acuerdos con Francia y Alemania, a garantizar la calidad radioastronómica del Observatorio de Pico Veleta y se ha aceptado un protocolo para la protección de la calidad astronómica de Sierra Nevada.

Todas las medidas tendentes a controlar los factores ambientales antes citados, amén de necesarias, son compatibles con el normal desarrollo de una región y pueden contribuir a un uso más racional de la energía. La UAI recomienda que la luz de origen artificial no exceda del 10 % del valor de brillo del fondo de cielo debido a causas naturales para cualquier zona del cielo en las longitudes de onda del espectro visible. Para hacernos una idea del efecto de la contaminación lumínica, baste decir que el hecho de duplicar la luz del cielo significa dividir por la mitad el rendimiento de un telescopio. Así, un telescopio de 4 metros de diámetro de espejo en un lugar contaminado no superará el rendimiento de otro de 2,8 metros instalado en un lugar adecuado, pese a que el precio de aquél triplica al de éste.

La solución a este problema es, sin embargo, sencilla y económica. Basta con recurrir al empleo de lámparas de vapor de sodio de baja presión, poco contaminantes y más eficientes. Para estas emisiones monocromáticas, la iluminación artificial no debe exceder el mínimo natural del fondo de cielo en esas longitudes de onda, es decir, se admite una tolerancia del 100 % sobre el valor natural. Obviamente, la potencia de iluminación de una determinada zona dependerá de su distancia a un observatorio y de la orografía del terreno.

A una menor contaminación y mayor eficiencia contribuye también el uso de parasoles y pantallas, que evitan la emisión de luz hacia el cielo y permiten concentrar mayor cantidad de luz hacia el objeto que se pretende iluminar. Por otra parte, la reducción o eliminación de humos y otros gases contaminantes es una medida que no sólo afecta a las condiciones de observación del cielo, sino que son también parte de nuestra calidad de vida. En cuanto a la protección radioeléctrica, las medidas a adoptar pasan por limitar en potencia y en frecuencia las emisiones de ondas radioeléctricas en las cercanías de los observatorios y por evitar la instalación de emisores o repetidores en las zonas de frecuencias próximas a los radiotelescopios.



Algunos ejemplos de buena y mala disposición de la iluminación exterior

RAFAEL RODRIGO
Instituto de Astrofísica
de Andalucía, CSIC. Granada

Proteínas

Autoensamblaje, deshidratación y estabilidad

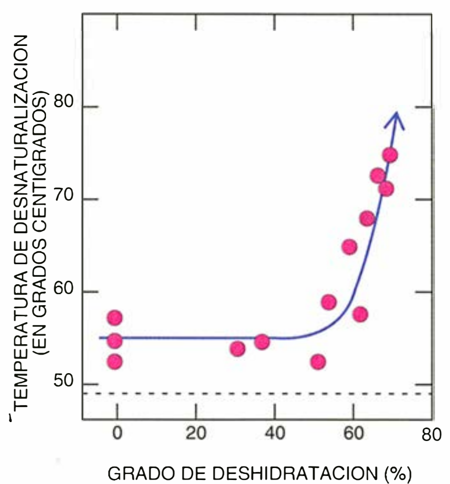
Las máquinas constan, por lo común, de piezas fabricadas por separado y luego ensambladas por el hombre o por un robot, otra máquina ya ensamblada. Si nos fijamos ahora en los seres vivos y los consideramos en un plano molecular, encontraremos numerosas estructuras con dimensiones en el intervalo de 1 a 100 nanómetros (1 nm = 10^{-9} m): proteínas, ribosomas, agregados de proteínas, partículas víricas, etcétera. Estas estructuras nanométricas, diseñadas para llevar a cabo tareas específicas, constan de varias piezas correctamente ensambladas. Las piezas son biomoléculas, proteínas sobre todo. Pero no existe aquí un ensamblador externo: las nanoestructuras se forman por autoensamblaje de las piezas constituyentes. Por autoensamblaje molecular entendemos la asociación espontánea de moleculas en agregados estructuralmente bien definidos y mantenidos por interacciones

no-covalentes; así, el ribosoma se forma mediante el autoensamblaje ordenado de 55 proteínas y tres cadenas de ácido ribonucleico.

El autoensamblaje de estructuras biológicas se basa en el reconocimiento molecular. Las macromoléculas vecinas de la estructura ensamblada presentan superficies de contacto complementarias en las que se establecen interacciones no-covalentes que contribuyen a la fortaleza y la especificidad de la unión: fuerzas de van der Waals, enlaces de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas e interacciones electrostáticas. Los organismos utilizan el reconocimiento molecular y el autoensamblaje para crear nanoestructuras funcionales, que a su vez se ensamblan en estructuras complejas cada vez mayores hasta llegar al propio organismo.

Hasta el momento sólo conocemos a grandes rasgos los factores que determinan la relación entre secuencia primaria, estructura espacial, función e interacciones en las proteínas. Aunque es posible modificar a voluntad la secuencia primaria, no podemos confiar en el diseño de la estructura espacial, función e interacciones de una proteína, no hablemos ya del autoensamblaje de varias en una nanoestructura funcional. Este resulta ser el primer problema al que hemos de hacer frente cuando pretendemos aplicar los principios del autoensamblaje fuera del marco biológico original; por ejemplo, en el diseño de nuevos materiales o en la fabricación de nanoestructuras funcionales.

Un segundo problema, no menos fundamental que el anterior, tiene que ver con la baja estabilidad de las proteínas, la mayoría de las cuales se desnaturalizan a temperaturas superiores a la ambiente pero inferiores a 100 ºC. Por desnaturalización entendemos la pérdida de la estructura espacial nativa (y de la función asociada a dicha estructura) de la proteína y la adopción, por parte de la cadena polipeptídica, de configuraciones más o menos aleatorias.



La deshidratación puede conducir a la termoestabilización de proteínas; los datos muestran el efecto de la deshidratación sobre la estabilidad de la α-quimotripsina inmovilizada en una matriz polimérica; la temperatura de desnaturalización se incrementa considerablemente para grados altos de deshidratación

La baja estabilidad térmica no constituye un problema para los organismos, la mayoría de los cuales se desenvuelven a baja temperatura. Pero sí lo es para muchas aplicaciones que requieren temperaturas altas. Además, una baja estabilidad térmica va generalmente acompañada por una baja estabilidad temporal a temperatura ambiente. De nuevo, esto no es un problema para los organismos en los que las proteínas se sintetizan y degradan continuamente, pero cualquier aplicación técnica de una proteína requiere que ésta sea estable en un período de días, meses o incluso años.

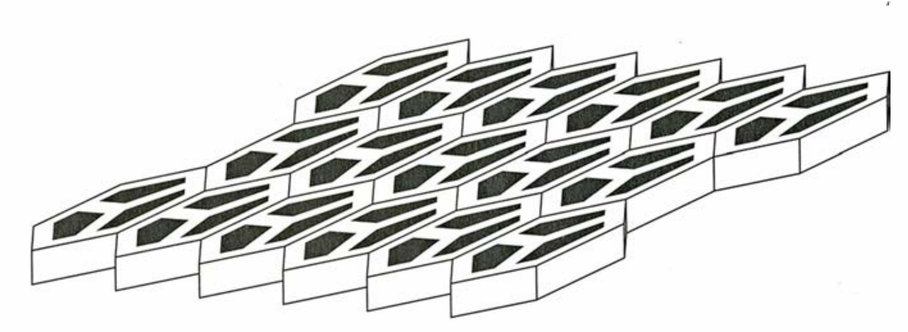
Entre los posibles procedimientos para la estabilización de proteínas, la deshidratación resulta ser uno de los más eficaces y de aplicación más general. Se sabe desde hace unos treinta años que las enzimas liofilizadas son extremadamente resistentes a la inactivación térmica, incluso a temperaturas muy superiores a los 100 ºC. Esta estabilización suele atribuirse a la merma de libertad conformacional de la proteína en ausencia de agua, lo que implica una alta barrera energética para el proceso de desnaturalización: la proteína queda cinéticamente atrapada en la estructura nativa.

Merced a la alta estabilidad de las proteínas liofilizadas puede disponerse de enzimas funcionales en entornos que han sido esterilizados por la alta temperatura. Otro aspecto más general reviste un interés mayor: las enzimas liofilizadas y posteriormente suspendidas en disolventes orgánicos anhidros mantienen su capacidad de catalizar eficazmente reacciones químicas. Entre las nuevas aplicaciones de esta enzimología en medios no acuosos merecen citarse la catálisis enzimática a alta temperatura y la catálisis de reacciones termodinámicamente desfavorables en el medio acuoso habitual. Por último, la investigación sobre la bacteriorrodopsina, una proteína de membrana, sugiere que la deshidratación puede utilizarse ventajosamente en la fabricación de estructuras funcionales mediante autoensamblaje de proteínas.

La bacteriorrodopsina es propia de *Halobacterium halobium* (o *Halobacterium salinarium*), bacteria que habita en medios donde la concentración de sal puede sextuplicar la salinidad media de agua del mar. Cuando la concentración de oxígeno en el medio desciende por debajo del valor mínimo necesario para mantener la respiración celular, se forma la membrana púrpura, estructura que permite la utilización de energía solar en la síntesis del ATP y confiere un tono rojizo al medio.

La membrana púrpura mide entre 500 y 1000 nanómetros de diámetro, tiene un espesor de sólo 5 nm y está formada por lípidos y varias decenas de miles de moléculas de bacteriorrodopsina, ordenadas en una red cristalina bidimensional. Cada molécula de bacteriorrodopsina es una cadena de 248 aminoácidos, plegada en siete hélices alfa que atraviesan la membrana y que porta una molécula de retinal (responsable de la coloración rojiza) unida a un resto de lisina.

La absorción de luz por parte del retinal origina cambios en la molé-



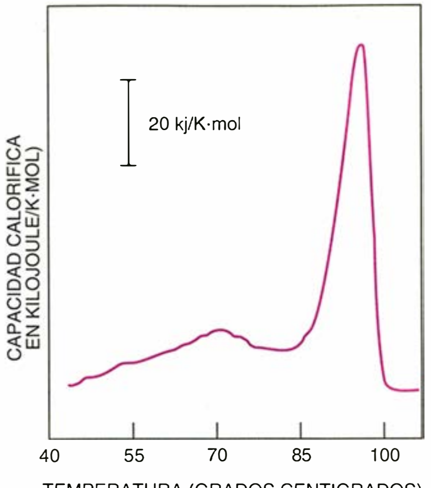
Representación esquemática de una parte de la membrana púrpura de Halobacterium halobium*; esta estructura está formada por moléculas de la proteína bacteriorrodopsina (*en negro*), agrupadas en trímeros los cuales, a su vez, se disponen formando una red hexagonal bidimensional. Moléculas de lípido (unas diez por cada molécula de proteína) actúan como adhesivo entre los trímeros de bacteriorrodopsina*

cula de bacteriorrodopsina que se traducen en la traslocación de protones desde el interior de la bacteria al medio extracelular. El organismo puede utilizar la energía almacenada en el gradiente electroquímico así creado para impulsar la síntesis del ATP. Es decir, la membrana púrpura es una nanoestructura biológica, formada mediante el autoensamblaje de lípidos y moléculas de bacteriorrodopsina, que actúa como un dispositivo de conversión de energía solar.

¿Qué sucede cuando sometemos una suspensión de membranas púrpura a un proceso de deshidratación controlado? Se forma una película de unas micras de espesor (1 μm = 10^{-6} metros), estructurada en multicapas en virtud del apilamiento de las membranas púrpura. Este apilamiento puede considerarse como un proceso de autoensamblaje inducido por la deshidratación. [En general, el autoensamblaje de una estructura a partir de las partes que la integran debe superar una barrera entrópica, resultante del hecho de que las partes libres e independientes en disolución tienen una mayor entropía traslacional que la estructura ensamblada; la entropía traslacional de cualquier partícula está relacionada con el volumen en que ésta puede moverse; la deshidratación disminuye el volumen accesible y, por tanto, la entropía traslacional de las partes —membranas púrpura, en este caso—, eliminando la barrera entrópica y facilitando el autoensamblaje.] Además, la deshidratación conduce a un material de una estabilidad excepcional. Así, en la estructura en multicapas ordenadas, la bacteriorrodopsina mantiene su estructura nativa y funcional incluso a temperaturas de hasta 140 ºC.

Tras esas propiedades se esconde un futuro prometedor para el aprovechamiento de las películas de membranas púrpura. La bacteriorrodopsina es una proteína fotocrómica: bajo ciertas condiciones, la absorción de luz por parte del retinal conduce a un cambio reversible en sus propiedades ópticas (cambio de color) y puede utilizarse un láser enfocado sobre pequeñas regiones del film para escribir información en él. Esta memoria óptica, por así decir, puede competir en rapidez con las memorias de ordenador basadas en los semiconductores. Igualmente, se ha comprobado la aplicabilidad de estas películas en el diseño de moduladores espaciales de luz para el procesamiento óptico de información.

Estamos aún muy lejos de poder emular a los organismos vivos en lo que se refiere al diseño y aplicaciones de nanoestructuras funcionales. Pero resulta alentador comprobar que ciertos avances de la técnica se fundamentan en el uso de nanoestructuras biológicas como la membrana púrpura de *H. halobium*.



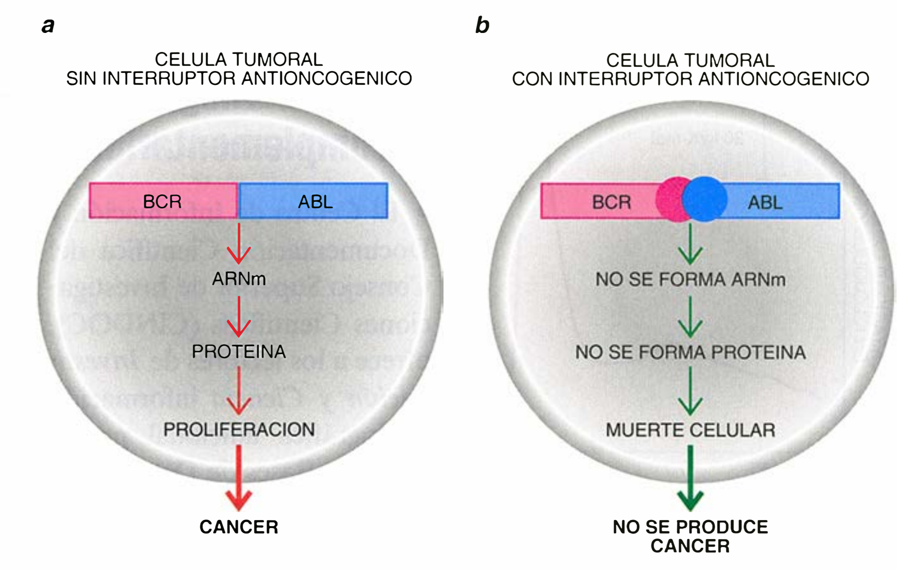
Termograma de calorimetría diferencial de barrido correspondiente a una suspensión de membranas púrpura. La pequeña transición que se observa sobre 70 ºC corresponde a una alteración en la red cristalina bidimensional. La transición mayor que aparece sobre 90 ºC está asociada a la desnaturalización de la bacteriorrodopsina

JOSÉ M. SÁNCHEZ-RUIZ
JOSEFA NÚÑEZ-OLEA
Facultad de Ciencias.
Universidad de Granada

Interruptores génicos

Contra el cáncer

El problema fundamental en el tratamiento eficaz de los pacientes con cáncer (leucemias y tumores sólidos) reside en distinguir entre células normales y células tumorales. A lo largo de los últimos años se ha avanzado bastante en la comprensión de la biología molecular del cáncer, plasmada en el descubrimiento de nuevos mecanismos de destrucción tumoral. Gracias a la caracterización molecular de las anomalías cromosómicas específicas de cada tumor, se ha puesto de manifiesto la formación o activación de genes directamente implicados en el desarrollo tumoral. Las secuencias de fusión génica, generadas como consecuencia de la anomalía cromosómica, son dianas terapéuticas ideales; en efecto: son únicas y específicas de cada tumor, es decir, sólo existen en las células tumorales, no en las células normales del paciente.



Interruptor génico que inhibe la expresión del gen BCR-ABL. La translocación cromosómica t(9;22)(q34;q11) supone la fusión de los genes BCR y ABL, involucrados en la génesis de un tipo de cáncer hematológico (leucemias). Mediante un interruptor génico podemos bloquear la expresión de la fusión oncogénica BCR-ABL e impedir así el desarrollo tumoral celular

Para que un gen se active, cierto grupo de proteínas, los factores de transcripción, deben unirse a determinado segmento del gen, el promotor. Muchos factores de transcripción están compuestos de estructuras especiales, los dedos de cinc, perfectamente adaptados para reconocer ADN. Esas estructuras son monoméricas y, en su interacción con el ADN, no requieren secuencias palindrómicas; cada dedo de cinc reconoce sólo tres nucléotidos. Aprovechando ese fenómeno, hemos generado drogas antitumorales especifícas que reconocen las secuencias quiméricas de fusión génica. Las proteínas con dedos de cinc que reconocen secuencias de ADN no predeterminadas ni prefijadas se denominan *interrruptores génicos*.

En nuestros estudios hemos usado como diana la secuencia de fusión génica subsecuente a la translocación cromosómica t(9;22)(q34;q11), conocida como cromosoma *Philadelphia*. Esta translocación cromosómica supone la fusión de los genes BCR y ABL, directamente implicados en la génesis tumoral en pacientes leucémicos. Estas células expresan la proteína determinada por el oncogén de la fusión; pero, cuando reciben vectores de expresión que producen el *interruptor antioncogénico* (una proteína de tres dedos de cinc que reconoce la secuencia de fusión génica BCR-ABL), entonces esas células no fabrican la proteína oncogénica responsable de la génesis tumoral.

Dada la versatilidad de los dedos de cinc en su interacción con el ADN, podrían crearse proteínas que reconozcan no sólo las fusiones génicas secundarias a las anomalías cromosómicas, sino también mutaciones puntuales en genes involucrados en patología tumoral y no tumoral. Los interruptores génicos nos facultan para empezar a trabajar en la posibilidad de silenciar la expresión de genes no deseados o de activar la expresión de genes necesarios. Aunque estas posibilidades han constituido siempre un sueño científico, los interruptores génicos, capaces de activar y desactivar genes, abren una nueva vía para la investigación y tratamiento de las enfermedades.

ISIDRO SÁNCHEZ GARCÍA
Instituto de Microbiología Bioquímica
Universidad de Salamanca

Objetos astronómicos

Denominación de origen

El año pasado los astrónomos se encontraron con un hallazgo singular mientras analizaban las imágenes procedentes de la nave *Galileo*: Ida, asteroide roqueño de tan sólo 50 kilómetros de sección en órbita entre Marte y Júpiter, tenía su propia, minúscula, luna. Para la comunidad astronómica, el descubrimiento obliga a preguntarse sobre el origen de Ida y su satélite; para el grupo de expertos adscritos a la sonda *Galileo*, plantea un problema más urgente: ¿qué nombre darle a la luna?

La tarea no es tan sencilla como pudiera parecer. Resultó fácil bautizar los planetas del sistema solar, pues sólo se han descubierto tres en tiempos modernos. Nuevos cometas se descubren más a menudo; pero se benefician de un convenio ya establecido según el cual cada uno lleva el nombre del descubridor. Del orden se pasa al caos en el caso de los asteroides. Cada año se hallan centenares de ellos. Y el descubridor goza de una libertad cuasi-omnímoda para imponerle el nombre que le plazca. Por si fuera poco, las naves espaciales han transmitido imágenes de la mayoría de los cuerpos que pueblan el sistema solar, lo que ha desencadenado un torrente de rasgos y características que dibujan el relieve de tales objetos y que habrá que bautizar.

Para poner razón en el nomenclátor del firmamento, se fundó la Unión Astronómica Internacional (UAI), organismo con capacidad legislativa. Los rasgos orográficos de los planetas no pueden recibir el nombre de una persona viva, restricción que no se aplica a los asteroides. También están prohibidos, por controvertidos, los nombres de personajes políticos y religiosos de los últimos 200 años. Satélites planetarios y asteroides no pueden compartir un mismo nombre. "La institución rechaza denominaciones absurdas o contrarias al sentido común", manifiesta Brian G. Marsden, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, encargado de vigilar el proceso del nombramiento de los personajes secundarios del sistema solar.

El nombre de "Ida" encaja en la franja tradicional del espectro de denominaciones. Avistado el asteroide en 1884 por el astrónomo austriaco Johann Palisa, lo bautizó éste con el nombre de la montaña donde, según la mitología, el pequeño Zeus se escondió de su padre. Animados del talante de Palisa, los expertos de la sonda *Galileo* propusieron llamar Dactilo a la luna de Ida. Dactilos eran habitantes, mitad artesanos mitad magos, del monte Ida.

La UAI dudaba en un comienzo si valía la pena dar un nombre al satélite asteroideo. Al ser tantísimos los asteroides, la Unión espera conocer la órbita de un objeto antes de aprobar el nombre, y la *Galileo* no pudo observar la luna el tiempo suficiente para describir sus movimientos. Marsden terminó por reconocer que el descubrimiento del primer satélite asteroideo constituía entidad sobrada para saltarse las normas.

En el extremo más informal del sistema de nomenclatura nos encontramos con el asteroide Zappafrank. Tras la muerte del músico Frank Zappa, John Scatti, de Arizona, en-

cabezó una campaña dirigida a conseguir que un cuerpo celeste llevara el nombre del guitarrista. De inmediato, Marsden se vio inundado de correo electrónico. Debido a la estrecha amistad que unía a Zappa con Vaclav Havel, presidente de la República Checa, Marsden convenció a los astrónomos checos para que designaran un asteroide que llevara el nombre de Zappa. Ya existía un asteroide denominado Zappala y varios más cuyos nombre empezaba por Frank, por lo que la UAI aceptó el nombre de Zappafrank.

COREY S. POWELL

Biodiversidad oceánica

Causas de su pérdida

Se comprueba por doquier. Las poblaciones de peces y mariscos, de corales y moluscos, de gusanos marinos inferiores, están cayendo en picado. Las mareas tóxicas, la transformación del paisaje costero y la escorrentía de contaminantes aumentan en frecuencia y dimensión con la presencia humana. Los océanos, tanto en el litoral como en las profundidades abisales, pueden estar alcanzando un estado de crisis ecológica.

Para remediar esta situación, y trazar una estrategia ordenada a proteger y explorar la biodiversidad, se congregaron recientemente en Irvine expertos en ciencias del mar. Se admite que los organismos que viven en el océano presentan una variedad similar, si no mayor, que la de los ecosistemas terrestres. Pese a lo cual, no hay planes de conservación a gran escala. Por decirlo todo, ni siquiera existe un proyecto a gran escala que se proponga conocer la diversidad de especies oceánicas.

Los asistentes a la reunión empezaron por confesar su ignorancia. El sistema que estudian sigue siendo, en gran parte, un misterio. Hace algunos años J. Frederick Grassle señaló que las estimaciones realizadas hasta entonces del número de organismos que medran en los fondos abisales eran probablemente demasiado bajas. Al analizar el sedimento de una zona situada frente a las costas de Delaware y New Jersey, Grassle encontró 707 especies de poliquetos, o gusanos, y 426 especies de crustáceos. Todos estos animales se hallaban incluidos en las muestras recogidas por cajas al efecto de 30 centímetros de lado por 10 centímetros de alto. La investigación precedente hablaba de 273 especies de poliquetos.

Se convino en que el desconocimiento de la biodiversidad alcanzaba incluso a zonas estudiadas de forma exhaustiva. Lo corroboran los nuevos hallazgos sobre el coral de estrella, *Montastraea annularis*. Este organismo, "una suerte de rata de laboratorio de los corales", explica Nancy Knowlton, "es un coral que se ha estudiado por el derecho y por el envés". Pues bien, el grupo de Knowlton ha descubierto que esta especie coralina no es una, sino tres en aguas someras, con sus respectivas adaptaciones. (Cifra que podría multiplicarse en aguas más profundas.)

Más seguros se mueven los ecólogos marinos a la hora de acotar las amenazas que penden sobre los océanos. Salieron a relucir los sospechosos de costumbre (mareas negras, destrucción de estuarios, vertido de sustancias tóxicas e introducción de especies foráneas que compiten ventajosamente con las locales). Pero coincidieron en que la pesca encierra el mayor peligro para la biodiversidad marina, por encima de los contaminantes y la eutrofización. (La eutrofización, causada por un exceso de nutrientes procedentes de abonos y otros productos químicos, puede conducir a proliferaciones algales.)

Con insistencia creciente se viene informando de la reducción de pesquerías. Carl Safina subrayaba, en un artículo reciente publicado en *Issues in Science and Technology*, que las capturas de meros (Serránidos) y pargos (Lutiánidos) cayeron en un 80 por ciento durante los años ochenta, y la población de pez espada (Xífidos) en el océano Atlántico bajó a la mitad desde los años setenta.

Además de la disminución de peces (que puede tener efectos ecológicos de alcance desconocido), la pesca elimina con frecuencia el hábitat. Al arrastrar sobre el fondo, los barcos de pesca deshacen las comunidades bentónicas o dañan los arrecifes de coral. Les Watling cita el caso de la destrucción de esponjas en el golfo de Maine, avistadas por última vez en 1987. Estas esponjas pueden ser importantes lugares de cría para el bacalao (Gádidos).

No acaba ahí la lista de pesares. Todos los congregados tenían su queja sobre el tiempo transcurrido hasta dar con alguien capaz de identificar esta o aquella alga, o se lamentaban de artículos fundamentales con la taxonomía errónea. Un fallo cuya raíz estaba en la formación de los biólogos, que no habían sido adiestrados en la clasificación sistemática.

Tras la identificación correcta de las especies, se agazapa el reto de comprender las interacciones entre las mismas. La caza de ballenas puede haber alterado ya los océanos de forma irreversible. En efecto, los organismos abisales se alimentan de lo que cae de la superficie; y así, los cadáveres de ballenas pueden haber constituido una de las fuentes principales de nutrientes para las cadenas tróficas de los fondos profundos. Los huesos de las ballenas, ricos en azufre, sirven quizá de corredores por donde transitan, de un humero hidrotermal a otro, las bacterias del azufre y otros organismos. La disminución del número de cadáveres de cetáceos que llegan al fondo puede acarrear secuelas importantes en los procesos abisales.

MARGUERITE HOLLOWAY

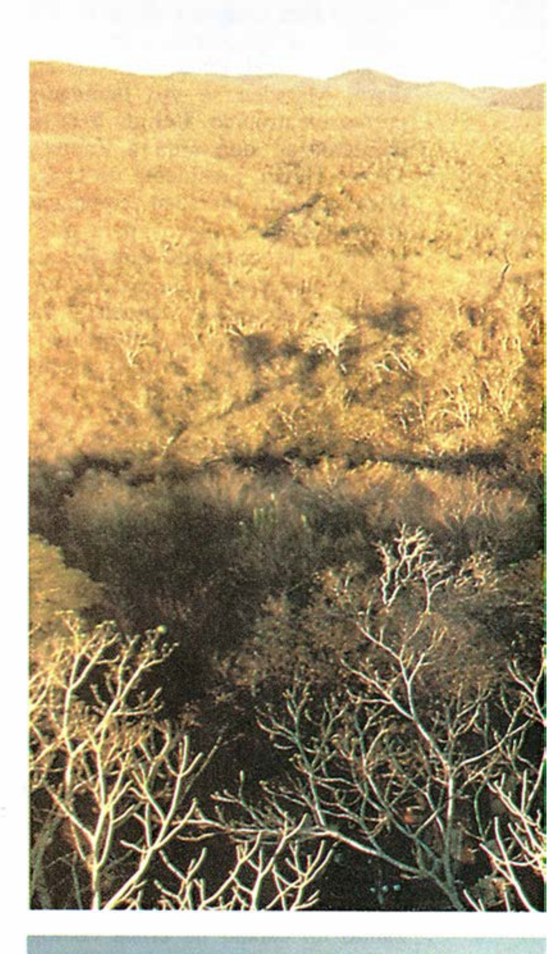


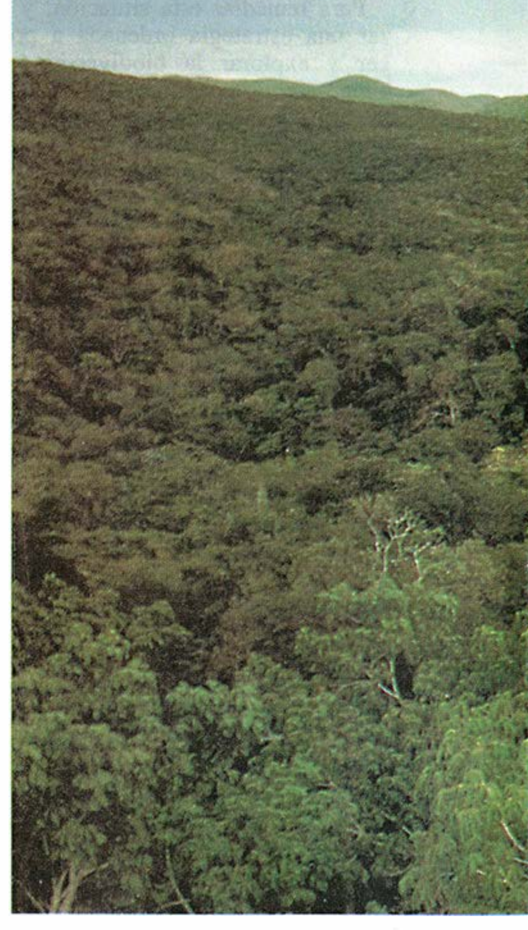
Las yubartas y otros grandes cetáceos pueden suministrar nutrientes cruciales a los habitantes de los fondos marinos

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer
y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Selvas caducifolias





Bosque tropical deciduo o caducifolio, selva sabanera o bosque seco tropical son sinónimos de selva caducifolia, una formación vegetal situada en una franja más o menos continua a lo largo de la costa del Pacífico desde Sonora hasta Panamá.

En las zonas tropicales con un período de sequía que dura de cinco a nueve meses, los árboles se han adaptado a las condiciones de aridez. La estación seca es el reloj que sincroniza la pérdida de las hojas, mecanismo del que se valen los árboles para ahorrarse el agua que habrían de liberar por transpiración foliar. En la época de lluvias la vegetación es exuberante. Debido a esos cambios estacionales, el número de especies es mucho menor que en las selvas lluviosas perennifolias.

Por su eficacia ilustrativa, me empeñé en obtener un testimonio gráfico del fenómeno de la estacionalidad de las selvas caducifolias o secas. Era fundamental disponer del mismo encuadre en época seca y en época húmeda. Elegí las selvas mexicanas. Una vez en el terreno, trepé a una torre metálica de unos treinta metros, medio desvencijada. No me atreví a subir el trípode por miedo a golpear los avisperos de los engarces de los tirantes y tuve que fotografiar tumbado, con la cámara apoyada en la plataforma para minimizar las vibraciones de la torre. Cuando volví tres meses después en la época seca, había dejado olvidada en Barcelona la primera foto que me daba la pauta del encuadre. Pero no me falló esta vez la memoria visual. Efectué, por si acaso, un cierto barrido para asegurarme una composición similar a la anterior.

Máquinas biomoleculares elásticas

Cadenas sintéticas de aminoácidos, modeladas a imagen de las que se encuentran en el tejido conjuntivo, transforman calor y energía en movimiento

Dan W. Urry

En los seres vivos, el movimiento constituye un fenómeno enigmático. Hablemos del parpadeo de un ojo, de la contracción de un músculo, de la súbita zancada de un corredor, del arranque y proyección de un levantador de pesas, diríase que el movimiento surge espontáneamente desde dentro. No es, desde luego, el de un avión, de un cohete o de un camión, que resulta de la expansión explosiva de gases a alta temperatura. Ni viene impuesto desde fuera, como en los veleros, las olas o los árboles, agitados por el viento.

Cada organismo es un ejemplo de cómo acoplar, con éxito, múltiples máquinas biomoleculares que transforman energía a partir de la luz o de sustancias químicas básicas en cualquier cosa que el cuerpo necesite —movimiento, calor o la construcción y organización de las estructuras internas. A lo largo de los últimos 40 años, los bioquímicos han venido reproduciendo el diseño de las proteínas que forman los principales componentes de esas máquinas. Muy recientemente, mis colegas y yo hemos logrado crear modelos artificiales que realizan las conversiones de energía propias de los seres vivos. Estas moléculas elásticas pueden estirarse y contraerse en respuesta a señales químicas y eléctricas, o pueden generar productos químicos ante estímulos mecánicos. En teoría, estas moléculas se hallan capacitadas para convertir cualquier tipo de estímulo en cualquier otra forma de energía.

Las máquinas biomoleculares sintéticas pueden imitar las funciones de distintas proteínas, pero son mucho más simples. Al haberse prescindido en ellas de elementos no esenciales, facilitan a los biólogos una mejor comprensión de los mecanismos celulares básicos. El principio que subyace bajo su funcionamiento podría ser, en mi opinión, el responsable de todos los tipos de interconversiones biológicas de energía.

Estas moléculas ofrecen también grandes posibilidades de aplicación, no sólo en medicina. Permiten la dosificación de medicamentos, evitan la formación de tejido cicatrizado y absorben líquidos en la piel. Ulteriores avances podrían originar un nuevo tipo de servomecanismo que combinara, con la capacidad de movimiento, sensores para el calor, la luz, la presión o los cambios químicos.

DAN W. URRY dirige, desde 1970, el laboratorio de biofísica molecular de la Universidad de Alabama en Birmingham.

Hace veinticinco años mis colegas y yo tomamos la senda iniciada por Miles Partridge, quien había analizado las proteínas estructurales elásticas del tejido conjuntivo. Purificamos elastina, una proteína que se encuentra en las arterias, ligamentos, pulmones y piel de todos los mamíferos, y advertimos que, cuando elevábamos la temperatura, una solución que contenía un fragmento particular, el alfa elastina, experimentaba una transición desde un estado desordenado hacia otro más ordenado. Al pasar de 15 a 25 grados centígrados, las moléculas se agregaban en una fase densa y pegajosa.

Todas las proteínas son largas cadenas de aminoácidos enlazados. A su vez, los aminoácidos constan de una cadena principal de carbono-nitrógeno y cadenas laterales adosadas, que los diferencian. En 1973, William R. Gray, Lawrence B. Sandberg y sus colaboradores descubrieron que la elastina contenía secuencias de aminoácidos que se repetían, entre ellas valina-prolina-glicina-glicina (VPGG) y valina-prolina-glicina-valina-glicina (VPGVG). De entonces acá, hemos sintetizado polímeros de estas y otras unidades de repetición y hemos estudiado su estructura. Sustituyendo uno de los residuos de valina por otros aminoácidos, como el ácido glutámico (E), la lisina (K) o la isoleucina (I), se obtienen fragmentos afines (VPGEG, VPGKG o IPGVG) con propiedades algo distintas. La incorporación de estos fragmentos en una cadena puede modificar el comportamiento de la cadena.

Descubrimos que, igual que en las muestras naturales correspondientes, las cadenas sintéticas de polímero empiezan en un estado extendido y se pliegan en hélice al elevar la temperatura. Las hélices se agregan y forman filamentos con las mismas proporciones que las de la elastina natural purificada; lo demostró el equipo de Laurie Gotte.

Las hojas y cintas creadas mediante entrecruzamiento de las moléculas (para lo que nos servíamos de la radiación gamma del carbono 60) presentaban un comportamiento similar al de piezas de caucho con formas parecidas. En particular, la elasticidad que exhibían era la entrópica de los fisicoquímicos. La elasticidad limitada que se ve en un alambre de metal se debe a la tensión de los enlaces interatómicos que lo mantienen unido —cuando la fuerza de deformación desaparece, los enlaces devuelven al material su longitud original. Pero puede ocurrir que, si se estira demasiado, se rompan los enlaces. Por el contrario, cuando una proteína elástica se estira, los enlaces de la cadena principal no se tensan; sí se restringe el movimiento de torsión de otros átomos alrededor de estos enlaces (y así la molécula entera queda más ordenada). Cuando la fuerza de deformación desaparece, la entropía —la tendencia natural hacia el desorden— recupera la configuración original, más libre, de las moléculas.

Todos nosotros somos pruebas vivientes de que la elasticidad entrópica perdura. Las fibras elásticas de las arterias humanas —especialmente las del arco aórtico— sobreviven más

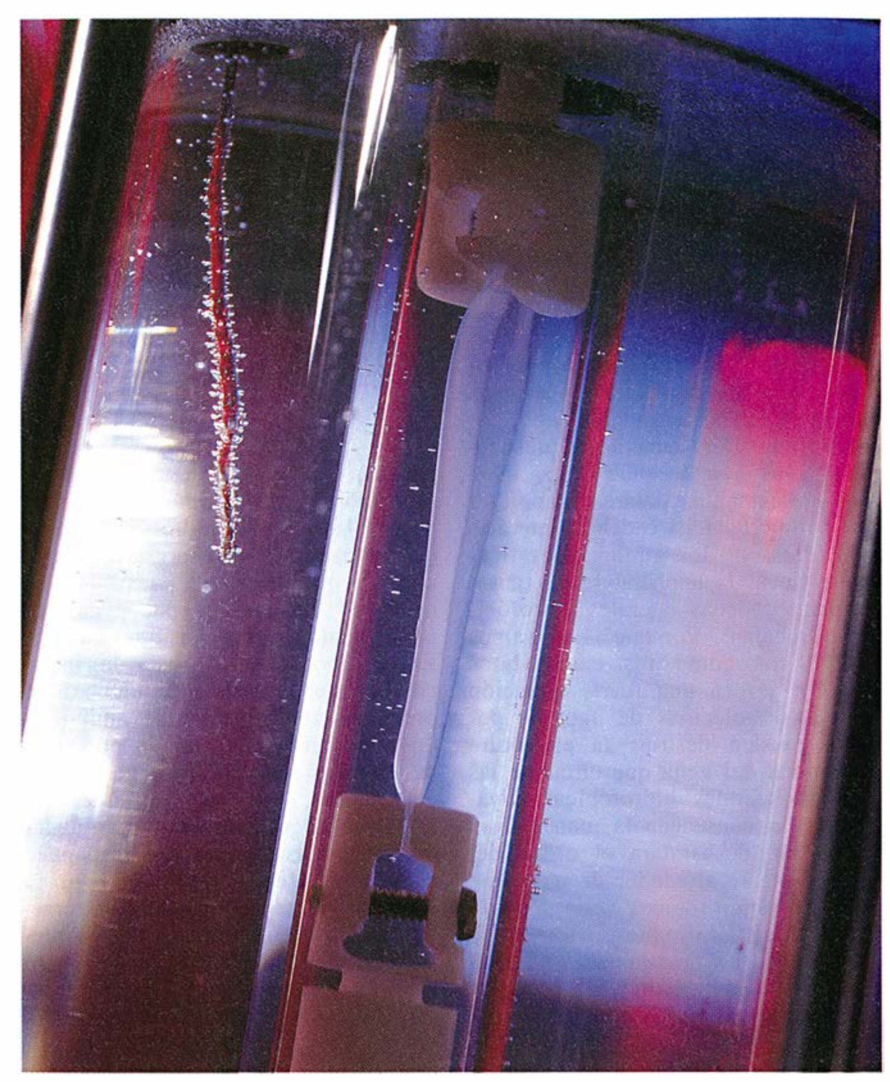
de 60 años, soportando miles de millones de ciclos de estiramiento y relajación.

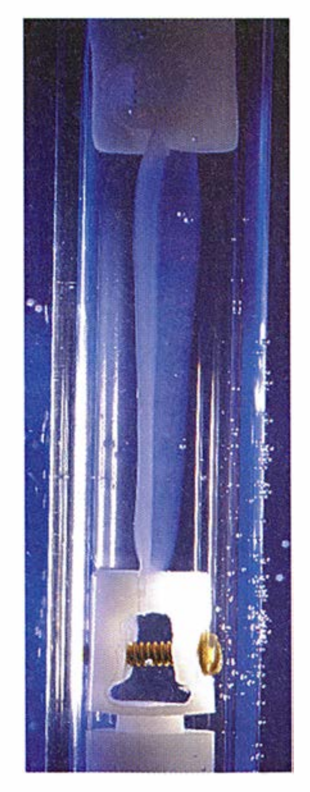
La naturaleza entrópica de estos polímeros elásticos plantea una cuestión básica sobre su comportamiento: ¿Cómo puede su estructura ordenarse progresivamente a medida que la temperatura aumenta? La mayoría de los materiales se desordenan a temperaturas más elevadas, fundiéndose o evaporándose. Por esa razón nos referimos al cambio en los polímeros como una transición térmica invertida.

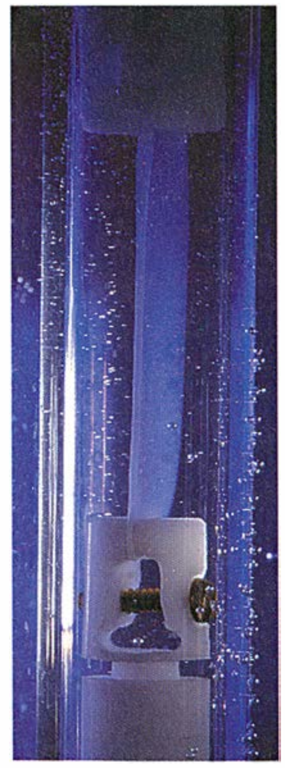
La explicación de este fenómeno yace en el agua que empapa los polímeros. Unas partes de la cadena polimérica son hidrofóbicas (o apolares) y otras son hidrofílicas (o polares); en consecuencia, las moléculas de agua se organizan según distintas configuraciones alrededor de las diversas secciones moleculares. La estabilidad relativa de estas configuraciones cambia con la temperatura, y lo mismo pasa con la estructura preferida por la proteína.

Por definición, las regiones hidrofóbicas rehúyen la interacción con el agua; y así, las moléculas de agua vecinas forman enlaces de hidrógeno entre sí, creando una serie de estructuras pentagonales. Esta disposición del agua ayuda a mantener el polímero en una conformación extendida: el plegamiento requeriría romper algunos de los enlaces de hidrógeno.

A baja temperatura, la estructura pentagonal es estable. Sin embargo, al aumentar la temperatura, aparece una tendencia hacia el desorden, y alcanzado cierto punto basta la energía térmica aleatoria de las moléculas de agua para desbaratar los enlaces de hidrógeno. La organización pentagonal deja paso entonces a los enlaces variables, amorfos, que caracterizan al agua líquida. Al no ser obstaculizada por el agua que la rodea, la proteína puede adquirir su conformación plegada. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, el aumento de desorden del agua es mayor que el aumento de orden de la cadena: la entropía total del sistema crece.









1. LAMINA DE PROTEINA sintética (*entre las pinzas, parte superior*): levanta un pequeño peso al ser calentada, transformando energía térmica en trabajo (*parte inferior*). La hoja, que se contrae y pierde transparencia a medida que aumenta su orden interno, consta de cadenas entrecruzadas de aminoácidos; cada cadena contiene 100 o más repeticiones de la secuencia valina-prolina-glicina-valina-glicina.

BIOPOLIMERO
A BAJA TEMPERATURA

Para poner este mecanismo en marcha, colocamos nuestras cintas y láminas elásticas en un baño de agua y elevamos la temperatura en un intervalo a lo largo del cual cabía esperar se produjera la transición térmica invertida. De acuerdo con lo previsto, los materiales se contrajeron hasta la mitad de la longitud que tenían hinchados. Reaccionando ante un cambio de temperatura, los biopolímeros habían transformado calor en trabajo, a la manera de los motores tradicionales. Una conversión muy eficiente: algunos biopolímeros levantan más de 1000 veces su peso seco.

La temperatura exacta en que ocurre la transición depende de las mezclas de segmentos polares y apolares del polímero. Las cadenas laterales hidrofílicas de los aminoácidos tienden a elevar la temperatura de transición; las cadenas laterales hidrofóbicas la rebajan. ¿Por qué? Los grupos hidrofílicos como los carboxilatos (COO^-) ejercen una fuerte atracción sobre las moléculas de agua y, por tanto, pueden destruir la estructura pentagonal del agua que circunde las cadenas laterales hidrofóbicas adyacentes. En consecuencia, una temperatura que desbaratara el orden del agua existente alrededor de una serie de grupos hidrofóbicos vería sobrado su efecto cuando hubiese cadenas hidrofílicas en las proximidades: el agua se habría desordenado ya.

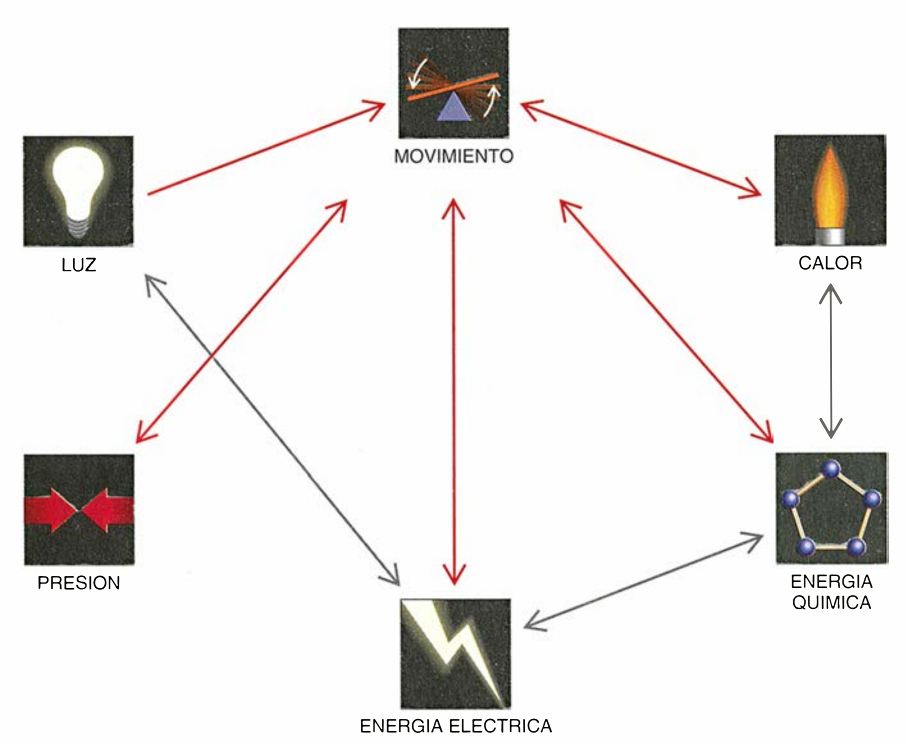
Al añadir grupos hidrofílicos a una cadena, se eleva la temperatura de transición. Simultáneamente, sin embargo, los grupos hidrofílicos reducen la cantidad de energía requerida para el plegamiento, pues sólo se necesita deshacer los pocos enlaces pentagonales del agua que quedan. En un biopolímero, basta la inserción de dos unidades de carboxilato por cada 100 residuos de aminoácidos para rebajar, en un 75 por ciento, el calor requerido por el proceso de pliegue.

Cierto es que, cuando los animales se mueven, sus músculos responden a señales electroquímicas y no a cambios de temperatura. Para remedar este comportamiento, hemos preparado variantes de nuestro polímero bioelástico original; en ellas, un estímulo puede activar el plegamiento o despliegue alterando la temperatura de transición. Cambia la respuesta de la cadena molecular al entorno térmico, aunque éste permanece constante. (Llamo a este efecto el mecanismo ΔT_t- por la manera como manipula la temperatura de transición, T_t.)

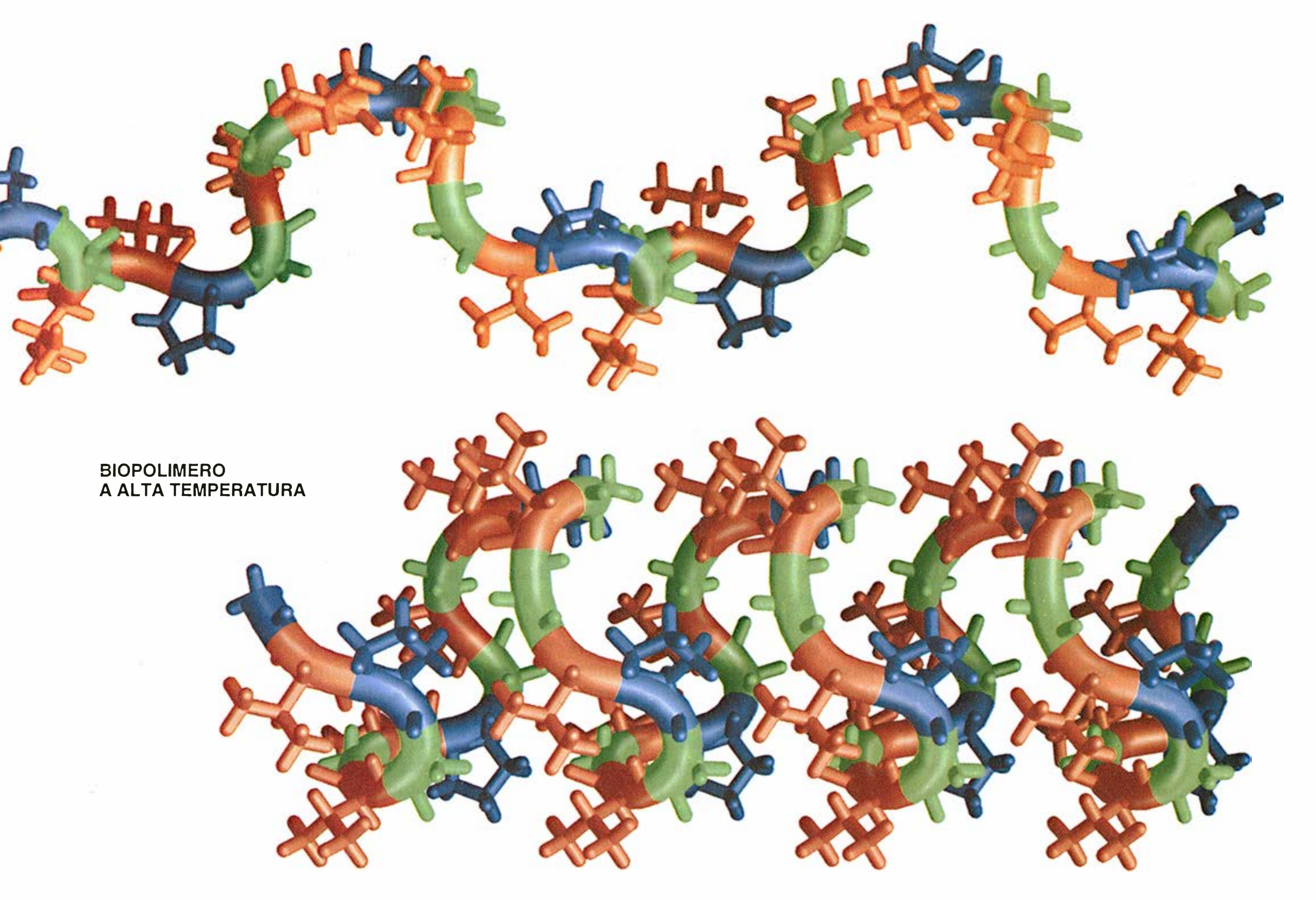
La clave de esta versatilidad la posee un aminoácido con una cadena lateral que pueda cambiar su comportamiento, hidrófobo a hidrófilo (y a la inversa), según las condiciones ambientales. Logramos nuestro primer éxito con el ácido glutámico, cuya cadena lateral se presenta como COOH en condiciones ácidas y como COO^- a *p*H neutro. El COOH es más hidrofóbico que el COO^- cargado; por ello, a temperaturas fisiológicas una cinta que contenga ácido glutámico debería contraerse a *p*H bajo y expandirse con el *p*H aproximadamente neutro que prevalece en el interior de los organismos vivos.

Demostramos este comportamiento con una lámina de poli [4(VPGVG), (VPGEG)], polímero en el cual una de cada cinco secuencias repetidas de aminoácidos contiene un residuo de ácido glutámico en lugar de una valina. Al modificar el *p*H de siete a cuatro, la hoja se contrajo levantando un peso. Este experimento supuso, según nuestra información, la primera ocasión en que un modelo de proteína sintético convertía reversiblemente energía química en cinética.

Las condiciones químicas en las que se presenta plegamiento tienen que ver con la mezcla de cadenas laterales hidrofílicas e hidrofóbicas, igual que acontecía en la transición controlada exclusivamente por temperatura. Si las cadenas laterales de un polímero son predominantemente hidrofóbicas, una gran cantidad de agua pentagonal debe perder su estructura antes de que la cadena pueda contraerse. Los requerimientos de energía permiten entonces desplazar la transición hacia un *p*H más eleva-



2. INTERCONVERSION, promovida por las máquinas biomoleculares, entre formas de energía. Algunas conversiones (por ejemplo, calor en movimiento) proceden directamente (*flechas rojas*), mientras que otras requieren un paso intermedio (*flechas grises*).



3. LA CADENA DE AMINOACIDOS se estira a baja temperatura (*parte superior*) y se contrae a temperaturas más altas (*parte inferior*). Los residuos de aminoácidos valina (*naranja*), prolina (*azul*) y glicina (*verde*) se enlazan entre sí formando un tercio de una vuelta de hélice. Las repeticiones de esta unidad básica engendran una estructura helicoidal —la espiral beta— con una sección de aproximadamente 1,8 nanómetros. La contracción o expansión de la espiral depende de las interacciones entre el agua y las cadenas laterales hidrofóbicas de ciertos aminoácidos.

do. Por ejemplo, si el ácido glutámico está rodeado por varios grupos muy hidrofóbicos, su cadena lateral permanecerá en el estado COOH a *p*H fisiológico. No obstante, la transición, una vez iniciada, se completará en un rango de *p*H mucho menor. Todos los grupos COOH cambiarán a COO^- cuando el *p*H pase de siete a ocho (el rango habitual se mueve entre cuatro y siete).

Hemos demostrado que podemos conseguir que una cadena proteica se expanda o se contraiga en respuesta a cualquier cambio reversible que eleve o rebaje su temperatura de transición. Podemos convertir energía eléctrica en cinética uniendo un grupo prostético (fragmento molecular que acepta o dona electrones) a la cadena. El grupo prostético es más hidrofóbico en su estado reducido, después de haber ganado un electrón, que en su estado oxidado. En consecuencia, la adición de electrones rebaja la temperatura de transición de la cadena, induciendo su plegamiento.

Un biopolímero que contenga residuos hidrofóbicos, pensemos en la fenilalanina, puede transformar cambios de presión en movimiento. Las cadenas se pliegan a baja presión y se despliegan cuando se someten a presiones más altas, que favorecen la estructura pentagonal del agua. Por último, podemos convertir luz en movimiento uniendo un grupo fotosensible: tanto el nitrobenceno como la cianamida pasarán desde un estado más hidrofóbico a otro más hidrofílico al ser irradiados con luz de longitud de onda apropiada.

Los bioquímicos analizan las bases moleculares de las células y sintetizan duplicados exactos de sus componentes. Cabe, pues, esperar que se dilucide si el mecanismo de transición térmica invertida es el que emplean los seres vivos. Todas las pruebas apuntan en esa dirección. En primer lugar, es el mecanismo más eficaz para dirigir el plegamiento y extensión de proteínas; y la selección natural tiene que haberlo descubierto en el transcurso de tres mil millones de años de evolución. Se trata, en efecto, del método más eficiente que se conoce en los polímeros para convertir energía química en cinética. Los polímeros que se expanden y se contraen en respuesta a la repulsión entre subunidades cargadas no alcanzan, ni de lejos, ese rendimiento, pues las moléculas de agua próximas apantallan unas cargas frente a otras. El ácido polimetacrílico, por ejemplo, debe convertir 15 veces más residuos cargados en neutros para realizar el mismo trabajo que uno de nuestros biopolímeros.

En segundo lugar, los fosfatos —elegidos, en forma de ATP (adenosín trifosfato) y sus equivalentes, como moneda de cambio energético en la mayoría de organismos— son óptimos para modificar la temperatura de transición. Resulta cuatro veces más eficaz añadir un fosfato que convertir ácido carboxílico en carboxilato. Igualmente eficaz es el

ATP ligado, que a estos efectos actúa como grupo fosfato dotado de múltiples cargas.

No fue sencillo comprobar el efecto de los fosfatos sobre nuestras cadenas moleculares. Hubo que crear un polímero que contuviera una secuencia de aminoácidos susceptible de fosforilarse y desfosforilarse fácilmente en presencia de enzimas en el fluido que lo rodeaba. Se logró con la subunidad peptídica RGYSLG (arginina-glicina-tirosina-serina-leucina-glicina) y una proteína quinasa, enzima que añade fosfato al residuo de serina. Insertando una fracción de un 3 por ciento de esa secuencia en nuestras cadenas obtuvimos polímeros que se desplegaban en presencia de quinasa. La fosfatasa alcalina, que elimina el fosfato, provocaba que las cadenas se plegaran de nuevo.

El mecanismo dirigido por fosfato que pusimos de manifiesto en nuestro biopolímero podía también controlar el plegamiento y asociación de proteínas en el interior celular. Cualquier proteína podría plegarse en una conformación compacta a la temperatura corporal si la temperatura del entorno facilitara la organización pentagonal del agua alrededor de sus superficies hidrofóbicas. Un grupo fosfato o una molécula de ATP ligada a la proteína permitiría al agua sin estructura envolver la zona y desplazar así el equilibrio hacia una conformación abierta.

Al forzar el despliegue de la proteína, el fosfato dejaría a la intemperie sitios de unión, vedados de suyo para otras proteínas, y facilitaría de ese modo interacciones cruciales. En este sentido, las proteínas de "choque térmico" (las chaperonas) promueven el plegamiento adecuado de ciertas proteínas que presentan notables superficies hidrófobas. Importa advertir que una de esas chaperonas tiene una forma homóloga al componente del músculo que se enlaza con ATP.

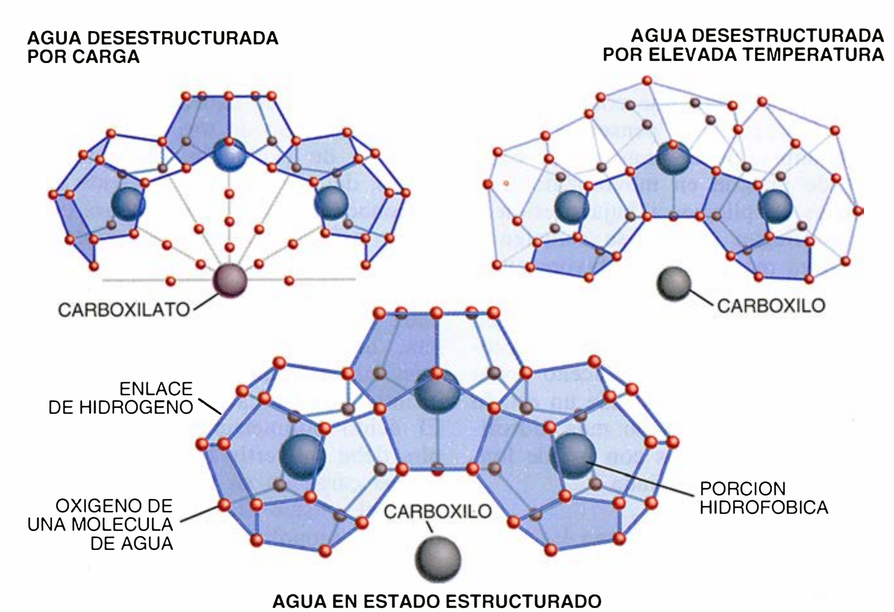
El mecanismo de transición térmica invertida subyace bajo la inmensa mayoría de las transformaciones biológicas de energía. A través del mismo podemos interpretar en buena medida la fosforilación oxidativa, proceso en virtud del cual la energía de los alimentos se convierte en ATP. En el interior celular, la oxidación y reducción de grupos prostéticos produce gradientes de protones que, a su vez, dirigen las reacciones de fosforilación que forman ATP. Todos estos pasos de conversión de energía podrían darse con el plegamiento y despliegue de proteínas en respuesta a los cambios operados en sus temperaturas de transición.

La fabricación de biopolímeros que reaccionen ante el ATP y las enzimas con éste asociadas favorecerá el conocimiento de otros mecanismos celulares básicos, lo que a su vez posibilitará la producción de repuestos sintéticos para los músculos y otros tejidos. En particular, los materiales bioelásticos ofrecen especial atractivo como repuestos de tejidos, pues pueden prepararse en toda una gama de consistencias. A tenor de los aminoácidos de las cadenas poliméricas, los productos serán gelatinosos, elásticos o rígidos como el plástico. Ajustar las propiedades elásticas del tejido que se reemplaza, ya sea de forma temporal o permanente, importa muchísimo para integrar lo sintético en el tejido vivo. Las células sufren la tensión que padece el tejido; la tracción (o compresión) dispara respuestas químicas que hacen que la célula funcione adecuadamente según su lugar de instalación.

Pero mucho antes de que los polímeros bioelásticos sustituyan a los tejidos encontrarán aplicaciones muy dispares en el cuerpo. A diferencia de los demás materiales, las láminas elásticas de poli (VPGVG) implantadas en conejos y ratas no ponen en alerta al sistema inmunitario. Biocompatibilidad que parece aprovechable en la prevención de adhesiones, esto es, en el crecimiento hipertrófico, doloroso y potencialmente maligno de tejido, subsiguiente a intervenciones quirúrgicas o traumatismos. La lámina de polímero, al actuar a la manera de vendaje interno, impediría la fusión de dos capas de tejido adyacentes.

Lynne D. Hoban, Taffy Williams y Adam Mckee colocaron una lámina esterilizada de poli (VPGVG) en las cavidades abdominales de ratas durante intervenciones que acostumbran acarrear adhesiones. Comprobaron que el material reducía el crecimiento del tejido nocivo hasta la insignificancia en el 80 por ciento de los casos. La mitad de las adhesiones que se formaron debiéronse a que la lámina se rasgó durante la operación. En los casos restantes, el hiperdesarrollo del tejido englobó la lámina, pero el polímero se separó fácilmente de la adhesión.

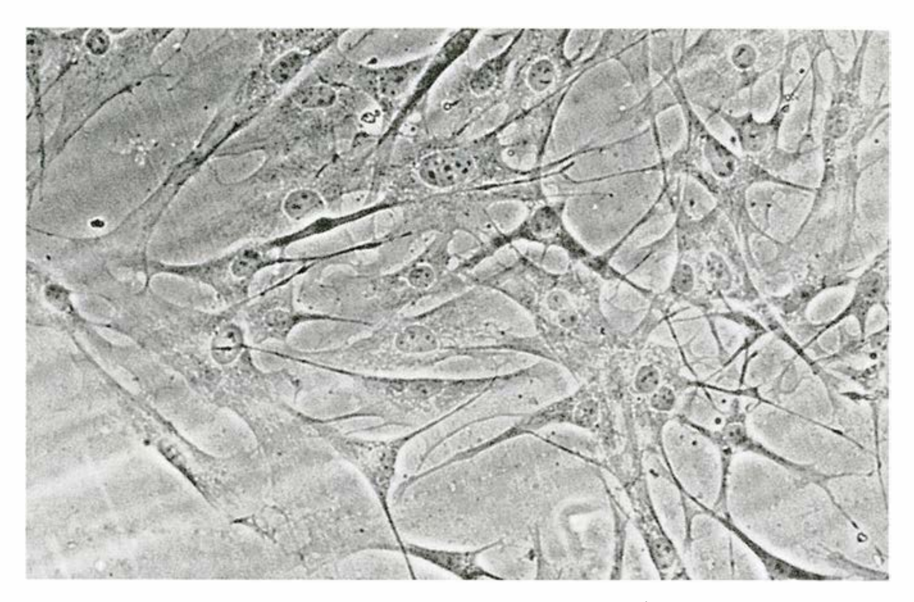
Otro campo prometedor para estos materiales lo ha descubierto la investigación en cirugía ocular. Los cirujanos corrigen el estrabismo (una desviación de los ojos) reponiendo músculos que controlan la mirada; pero se trata de un procedimiento que deja a veces tejido cicatrizado en el músculo, bloqueando así su funcionamiento. Frederick J. Elsas, del hospital oftalmológico de la Universidad de Alabama en Birmingham, comprobó en experimentos con conejos que, si envolvía los músculos cortados en una funda de



4. LA ESTRUCTURA PENTAGONAL DEL AGUA es el resultado de los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua adyacentes a los grupos moleculares hidrofóbicos. Este estado de baja energía es estable a baja temperatura (*centro*) pero se inestabiliza progresivamente a temperaturas más altas (*derecha*). Las moléculas hidrofílicas, dotadas de carga, pueden destruir esta estructura pentagonal (*izquierda*) forzando a las moléculas de agua a alinearse a su alrededor. Envolviendo un aminoácido, el agua pentagonal puede impedir el plegamiento, porque se requiere energía para romper los enlaces de hidrógeno de tal forma que el agua pueda desplazarse.

biopolímero, se evitaba la cicatriz. Estas cintas elásticas hallan otro dominio de aplicación plausible en cirugía correctora de desprendimientos de retina; pueden enrollarse alrededor del globo ocular para comprimirlo y estimular la curación, una vez reinstalada la retina mediante cirugía con láser.

Las cadenas sintéticas de polímeros pueden incorporar secuencias de aminoácidos biológicamente activos. Una lámina entrecruzada que contenga una unidad de la secuencia (de agregación celular) glicina-arginina-glicina-aspártico-serina-prolina (GRGDSP) por cada 40 unidades de GVGVP se mantiene todavía elástica y transparente. Sin embargo, en lugar de ignorar la lámina, las células se adhieren a ella, propagándose y creciendo hasta confluir. Podría diseñarse, por ejemplo, un andamio transitorio de material bioelástico para un vaso sanguíneo artificial, de suerte tal que, aun cuando el polímero cumpliera el papel estructural requerido, las células invadirían y convertirían la matriz en tejido natural.



5. LOS FIBROBLASTOS crecen en la superficie de un biopolímero cuya estructura se ha modificado químicamente para abarcar puntos de unión celular. (Versiones inalteradas e implantadas en el cuerpo no producen ni crecimiento celular ni inflamaciones.) Estos polímeros podrían reemplazar temporalmente arterias u otros tejidos.

Con biopolímeros más complejos podrían reproducirse no sólo las funciones mecánicas de los tejidos, sino también su comportamiento químico. Pensemos en una píldora portadora de agentes terapéuticos: podría irlos liberando a una tasa constante a lo largo del tiempo o a la razón que determinen los sensores que lleven incorporados —lo que Ralph Cristoffersen denomina un par diagnóstico-terapéutico.

Estos polímeros de suministro persistente podrían basarse en relojes químicos que convirtieran una carboxiamida neutra ($CONH_2$) en carboxilato (COO^-) en períodos cuyo rango puede oscilar de días a decenios. Podría acoplarse, en los dispositivos diagnóstico-terapéuticos, una combinación de enzimas y grupos prostéticos a las cadenas moleculares, de suerte que las condiciones del cuerpo controlasen el plegamiento o despliegue automático. Un biopolímero diseñado para controlar la diabetes, por ejemplo, podría incorporar un grupo prostético acoplado a la enzima glucosa reductasa. Conforme se elevara el nivel de azúcar en sangre, la enzima iría transfiriendo electrones desde el grupo prostético hacia las moléculas de glucosa próximas. El polímero, vuelto hidrofílico, se hincharía y soltaría insulina.

Los biopolímeros elásticos admiten aplicación fuera del dominio médico. Por lo común, las conversiones que controlan el plegamiento son reversibles, y así las moléculas pueden convertir trabajo mecánico en químico o en otras formas de energía con la misma facilidad con la que convierten luz, calor o presión en movimiento. Una planta de desalinización biomolecular podría basarse en una membrana de polímero que se contrajera en presencia de sal. Al mantener estirada la membrana en agua muy salada, se abrirían espacios para que las moléculas de agua (pero no las sales disueltas) formasen estructuras pentagonales alrededor de las cadenas laterales hidrofóbicas; de escurrir el agua purificada podrían ocuparse unos rodillos instalados en un depósito de descarga.

De la combinación de absorción de agua y sensibilidad a la temperatura nace otra aplicación más prosaica de los polímeros: un pañal eficacísimo y biodegradable. Imaginemos un pañal hecho de una cadena molecular que experimente una transición térmica invertida por debajo mismo de la temperatura normal de la piel. Cuando el líquido tocase la superficie interior, las moléculas ubicadas allí se empaparían, pero permanecerían en estado plegado. La tendencia de las cadenas de polímeros a desplegarse a temperaturas más bajas produciría la transferencia espontánea del líquido desde el cuerpo templado hacia la superficie exterior fría. La matriz seca podría absorber 10 veces su propio peso en agua, y después de usado los microorganismos del entorno degradarían prestamente el pañal.

He ahí una de las infinitas posibilidades de los biopolímeros elásticos, más allá de la medicina. Deben su versatilidad de uso a la capacidad que muestran para interconvertir formas de energía diversas. Detectan cualquier cambio en el medio y reaccionan con todo un registro de respuestas: químicas, eléctricas o físicas. En cuanto puedan fabricarse en masa, estos materiales deberían ser baratos y aplicables en cualquier necesidad. La implantación de los relojes moleculares, además, permitirá la degradación limpia de los productos fabricados con biopolímeros elásticos, una vez caduque su vida útil. Quién sabe si en el siglo que viene los mecanismos biomecánicos no transformarán la vida diaria con la intensidad con que la han modificado los mecanismos eléctricos en el nuestro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MEDICAL APPLICATIONS OF BIOELASTIC MATERIALS. D. W. Urry en *Biotechnological Polymers: Medical, Pharmaceutical and Industrial Applications.* Dirigido por Charles G. Gebelein. Technomic Publishing, 1993.

MOLECULAR MACHINES: HOW MOTION AND OTHER FUNCTIONS OF LIVING ORGANISMS CAN RESULT FROM REVERSIBLE CHEMICAL CHANGES. Dan W. Urry en *Angewandte Chemie, International Edition in English,* vol. 32, n.º 6, págs. 819-841; junio de 1993.

POSTULATES FOR PROTEIN (HYDROPHOBIC) FOLDING AND FUNCTION. Dan W. Urry en *International Journal of Quantum Chemistry: Quantum Biology Symposium,* vol. 21, págs. 3-15; 1994.

El complejo *bithorax* de *Drosophila melanogaster*

Uno de los mayores retos de la biología es la elucidación de los mecanismos subyacentes en el desarrollo. Para su estudio, el complejo bithorax *constituye un modelo aplicable a especies muy distantes entre sí*

Fernando Casares y Ernesto Sánchez-Herrero

El reino animal presenta una fascinante variedad de formas y estructuras. Fijémonos, por ejemplo, en el eje longitudinal, llamado también anteroposterior; en los vertebrados consta de cabeza, tronco y cola, mientras que en los insectos se compone de cabeza, tórax y abdomen. A lo largo de dicho eje se generan estructuras muy diversas en organismos muy distintos, como nuestros brazos o las alas de las mariposas. Gracias al espectacular avance de la biología del desarrollo sabemos que, bajo tamaña diversidad subyace, sin embargo, un mismo grupo de genes.

Hace ahora 100 años, William Bateson, biólogo inglés, encontró una variación peculiar en un artrópodo marino: la transformación de una anténula en mandíbula. Bateson llamó homeosis a ese fenómeno, del que describió sus dos características fundamentales: se trataba de una auténtica mandíbula y se hallaba en el lugar correspondiente a una anténula. Se había producido, pues, la sustitución local de la estructura normal por otra cuya ubicación anatómica no era aquélla.

Aunque este fenómeno se ha observado en diversos grupos animales, ha sido en la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*, donde se ha estudiado con mayor extensión. En ella se han caracterizado las mutaciones que causan este tipo de transformaciones, conocidas como mutaciones homeóticas. La naturaleza de los cambios producidos sugería que se deberían a la mutaciones en genes cuya función sería proporcionar la variedad morfológica de diferentes estructuras a lo largo del eje anteroposterior.

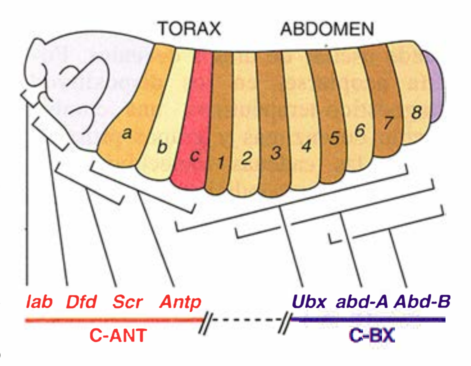
FERNANDO CASARES y ERNESTO SÁNCHEZ-HERRERO colaboran en el estudio de la biología del desarrollo de *Drosophila melanogaster* en el Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa" de la Universidad Autónoma de Madrid.

En los años diez se halló la primera mutación homeótica de *Drosophila*. Conocida por mutación *bithorax*, ha dado nombre al complejo de genes homeóticos mejor estudiado. El cuerpo de la mosca, lo mismo que el de muchísimos grupos animales, está segmentado. La cabeza consta de seis segmentos, tres el tórax (cada uno con un par de patas) y ocho el abdomen (aunque en el macho sólo se desarrollan seis). El segundo segmento torácico comprende la parte mayor del tórax dorsal y un par de alas. En el tercer segmento torácico se forman, en vez de alas, unas estructuras dorsales mucho menores, los balancines o halterios.

Alas y halterios del díptero presentan una parte anterior y una posterior, que constituyen unidades de linaje celular independiente. En las mutaciones *bithorax*, la parte anterior del tercer segmento torácico se transforma en la correspondiente del segundo segmento torácico, con lo que la mosca tiene ahora un segundo tórax (de ahí el nombre *bithorax*) y unas segundas "medias-alas" anteriores, en vez de las partes anteriores de los halterios.

En los años cuarenta, Ed Lewis, del Instituto de Tecnología de California, emprendió el análisis genético de tales mutaciones. Encontró otras mutaciones del tipo *bithorax*, y algunas que hacían la transformación complementaria dentro del tercer segmento torácico, es decir, que cambiaban la parte posterior de dicho segmento por la correspondiente del segundo. A estas últimas las llamó *postbithorax*. El doble mutante *bithorax postbithorax* transformaba completamente el tercer segmento torácico en el segundo, produciendo moscas con cuatro alas. Dichas mutaciones causan a estos insectos un gran inconveniente (no pueden volar) y a nosotros nos plantean una contradicción taxonómica: las moscas pertenecen al orden de los Dípteros (insectos con dos alas), pero estos mutantes violan flagrantemente su característica definitoria.

Lewis encontró, además, otras clases de mutaciones. Unas producían fenotipos opuestos a los descritos, es decir, la transformación del segundo en tercer segmento torácico. Otras mutaciones transformaban segmentos abdominales en otros abdominales. Asimismo halló que una deficiencia de la región cromosómica donde se localizaban todas estas mutaciones transformaba el tercer segmento torácico y todos los segmentos abdominales del embrión en el segundo segmento torácico. Los animales que las



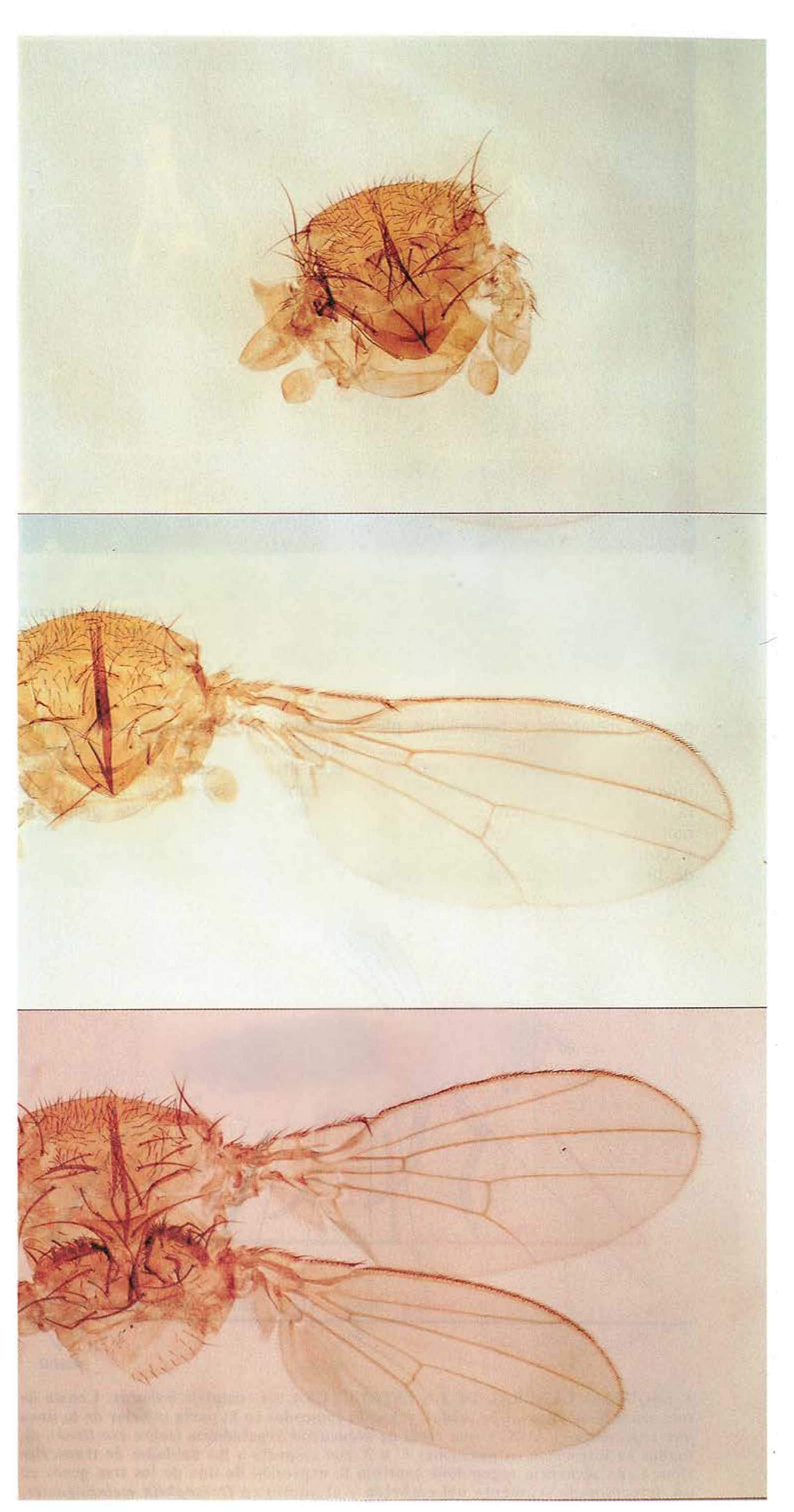
1. EXPRESION de los genes del complejo *Antennapedia* (C-ANT; el gen proboscipedia no está incluido) y del complejo *bithorax* (C-BX) en el embrión de *Drosophila*. Los genes se alinean en el cromosoma de acuerdo con su límites anteriores de expresión en los segmentos torácicos (*a*, *b* y *c*) o abdominales (*1-8*) del embrión. Esta característica, llamada colinearidad, y cuya explicación es aún desconocida, se mantiene en todas las especies estudiadas.

padecen no llegan a adultos, muriendo durante la fase embrionaria.

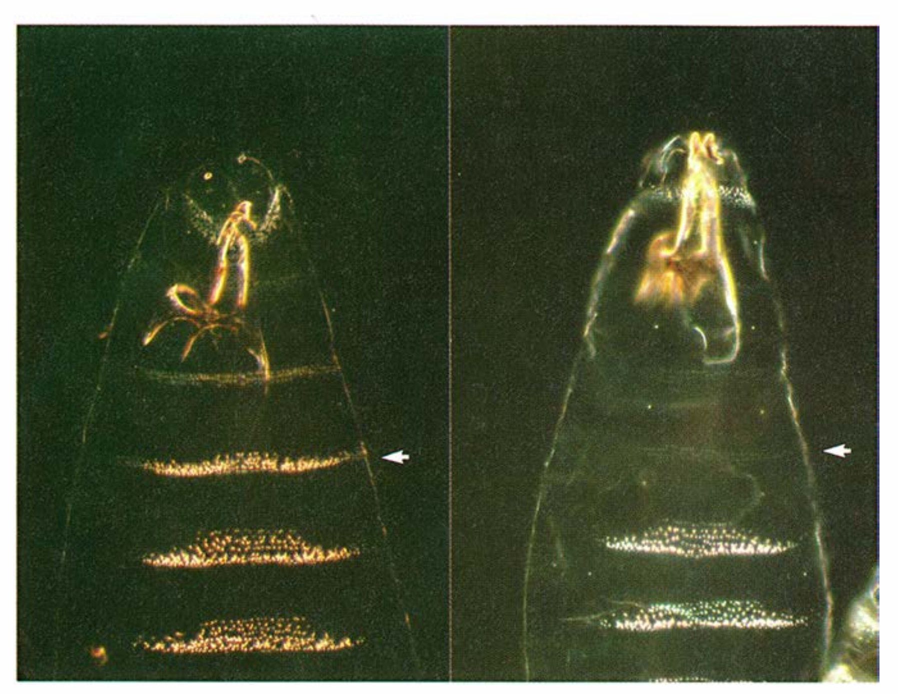
Un detallado análisis genético le permitió concluir que las mutaciones descubiertas se encontraban adyacentes en el cromosoma. Es decir, había en dicha región un conjunto de genes, mutaciones en los cuales producían transformaciones entre los segmentos torácicos y abdominales. Lewis llamó a este grupo de genes el complejo *bithorax* (C-BX).

Su análisis le llevó a un modelo de funcionamiento del C-BX que mostraba tres características sorprendentes. Primera, el complejo *bithorax* se componía de una serie de genes, uno por segmento (excepto en el tercer segmento torácico, que requería dos genes), encargados de determinar los rasgos propios de cada metámero o segmento. Segunda, la falta de función de un gen producía una transformación homeótica de un segmento en el correspondiente anterior. Tercera, y la más sorprendente, los genes se alineaban en el cromosoma en un orden que correspondía con el orden de segmentos en el eje anteroposterior de la mosca. Es decir, los genes requeridos para el tercer segmento torácico se encontraban en un extremo del complejo genético, el que especificaba el primer segmento abdominal a continuación, luego el del segundo segmento abdominal, y así sucesivamente hasta el gen requerido para el octavo segmento abdominal, localizado en el otro extremo del complejo.

La última característica, la alineación de los genes en el cromosoma según los segmentos que especifican, se conoce como colinearidad. Era, y lo sigue siendo, un fenómeno misterioso. ¿Se necesita realmente ese orden para el correcto desarrollo de los segmentos? Si bien parece que la continuidad absoluta de todos los genes no constituye un requisito estricto, la colinearidad se ha conservado en los complejos homeóticos de to-



2. LAS MUTACIONES HOMEOTICAS producen transformaciones entre diferentes segmentos. En la fotografía central se observa un ala (estructura mesotorácica) y un halterio (estructura metatorácica) de una mosca del vinagre. El ala no expresa el gen *Ubx*; el halterio, sí. Cuando falta la expresión de este gen en el metatórax, el halterio se convierte en ala (*fotografía inferior*), mientras que cuando se expresa inapropiadamente en el mesotórax (además de en el metatórax), el ala se transforma en halterio (*fotografía superior*). Por tanto, el producto del gen *Ubx* no sólo es necesario sino también suficiente para formar estructuras metatorácicas (halterios).

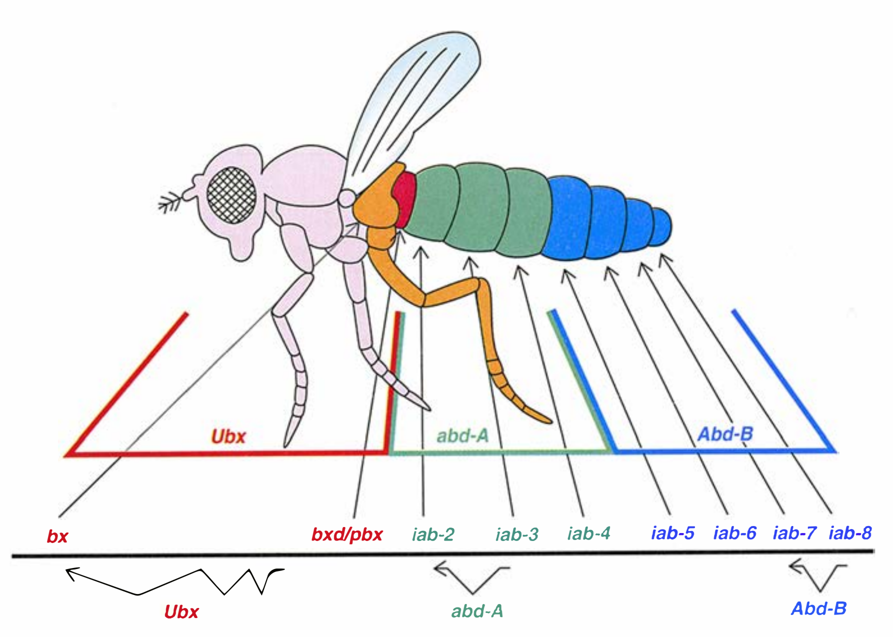


3. CUTICULAS EMBRIONARIAS. A la izquierda se muestra la de un embrión de genotipo silvestre; se aprecian las tres bandas de dentículos finos torácicos y tres bandas de dentículos abdominales (más gruesos). A la derecha se ofrece la cutícula de un embrión mutante para el gen *Ultrabithorax*. La falta de este gen produce una transformación del primer segmento abdominal (que normalmente posee dentículos más gruesos) en un segmento torácico (con dentículos más finos).

dos los metazoos, u organismos pluricelulares, estudiados.

Ninguna mutación del complejo *bithorax* transformaba segmentos de la cabeza o del tórax anterior. Durante los años setenta, Tom Kaufman y colaboradores, de la Universidad de Indiana, encontraron un complejo genético en *Drosophila*, en el mismo cromosoma que el C-BX aunque a gran distancia del mismo, que se encargaba de especificar dichos segmentos. Llamaron a este grupo de genes el complejo *Antennapedia*. Hallaron también que los genes se alineaban en el cromosoma según los segmentos que especificaban en el orden anteroposterior. Las reglas propuestas para el funcionamiento del C-BX parecían, pues, extenderse a este otro grupo de genes homeóticos. Había dos complejos genéticos en *Drosophila* localizados en distintas regiones del cromosoma tercero, que determinaban los diferentes segmentos del cuerpo. Los genes se alineaban en el cromosoma según los segmentos que especificaban en el eje anteroposterior.

Estos genes homeóticos especifican los segmentos del embrión, los de la larva y los del individuo adulto, lo que demanda su presencia permanente a lo largo del desarrollo. Sin embargo, muchas de las mutaciones homeóticas producen transformaciones completas entre segmentos y son letales durante el período embrionario. ¿Cómo se estudia, pues, la función de estos genes? Existen métodos tanto para la fase embrionaria como para el estado adulto.



4. ESQUEMA GENERAL DE LA ESTRUCTURA del complejo *bithorax*. Consta de tres genes homeóticos, *Ubx*, *abd-A* y *Abd-B*, indicados en la parte inferior de la línea que representa el ADN, y una serie de secuencias reguladoras (*sobre esa línea*), situadas en intrones o en posiciones 5′ o 3′ con respecto a las unidades de transcripción. Cada secuencia reguladora controla la expresión de uno de los tres genes en un determinado segmento del embrión y el adulto en *Drosophila melanogaster*.

Aunque los individuos mutantes mueran en su fase embrionaria, desarrollan una cutícula en la que podemos identificar los diferentes segmentos gracias a los elementos morfológicos característicos, lo que permite estudiar las transformaciones producidas por las mutaciones homeóticas en el embrión.

También se pueden analizar las transformaciones en el adulto mediante la producción de individuos mosaico, es decir, moscas en las que sólo parte de sus células son mutantes en la mutación homeótica que se estudia; para obtener tales individuos se crean clones de células mutantes por recombinación entre cromosomas antes de la mitosis (división celular). El proceso de recombinación sólo ocurre durante la meiosis (división con reducción del número de cromosomas), pero puede inducirse por irradiación durante el ciclo mitótico. Por ejemplo, si una larva heterozigótica para la mutación letal homeótica *Ultrabithorax, Ubx*/+ (la barra separa el genotipo de los dos cromosomas y el signo + indica el genotipo silvestre), se irradia con rayos X, se producirá, en algunas células, una recombinación entre cromátidas de cromosomas homólogos. Tras la mitosis, una de las células podrá ser homozigótica para la mutación letal, *Ubx*/*Ubx*, mientras que la otra será +/+, indistinguible fenotípicamente del resto de las células, *Ubx*/+. Tras sucesivas divisiones, la célula *Ubx*/*Ubx* originará un clon de células mutantes que dará lugar a una zona de cutícula adulta con transformación ho-

meótica. Si en el mismo cromosoma que porta la mutación homeótica se encuentra una mutación recesiva para un marcador cuticular, por ejemplo, una que altere la morfología o color de las cerdas, el clon podrá reconocerse por la característica particular de esta mutación. La transformación observada en el clon nos permitirá inferir la función normal del gen *Ubx*.

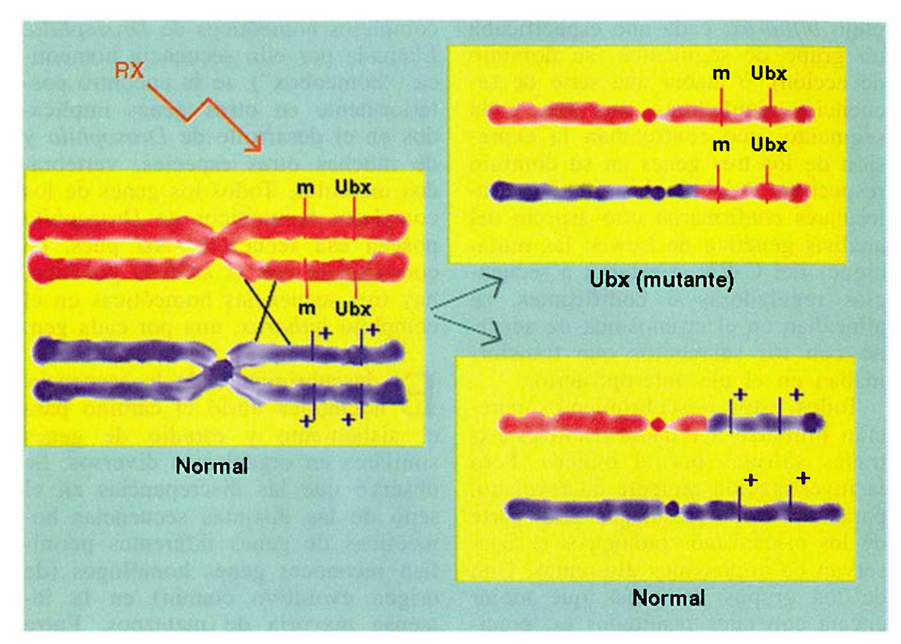
Aunque el complejo *bithorax* parecía contener diez genes diferentes, dos para especificar el tercer segmento torácico y ocho para los ocho segmentos abdominales, el análisis genético posterior reveló que el número real se reducía a tres. En 1985, uno de los autores (Sánchez-Herrero) y Jordi Casanova, bajo la dirección de Ginés Morata, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, abordaron la estructura genética del C-BX. En colaboración con Isabel Vernós y Roberto Marco, de la Universidad Autónoma de Madrid, se encontró que tres genes diferentes, *Ultrabithorax* (*Ubx*), *abdominal-A* (*abd-A*) y *Abdominal-B* (*Abd-B*), eran los únicos componentes del complejo *bithorax*. Similares resultados fueron obtenidos por el grupo de Robert Whittle, de la Universidad de Sussex.

¿Qué relación había entre estos genes y los genes cuyas mutaciones había estudiado Lewis? Más aún, ¿cómo podían sólo tres genes explicar una diversidad de nueve segmentos, uno torácico y ocho abdominales?

Había una respuesta verosímil: ciertas mutaciones transformaban un solo segmento y otras causaban la transformación de varios a la vez. En efecto, las mutaciones correspondientes a los tres genes descubiertos pertenecían a este último tipo. Así, el gen *Ubx* especificaba el tercer segmento torácico y el primero abdominal, el gen *abd-A* los segmentos abdominales segundo a cuarto y el gen *Abd-B*, los segmentos abdominales quinto a octavo. Las mutaciones que afectaban a un solo segmento formaban parte del fenotipo que producían las mutaciones en cada uno de estos tres genes. Aquellas podrían ser, por tanto, mutaciones que afectasen la regulación de los genes.

El análisis molecular del C-BX, emprendido por el grupo de David Hogness, de la Universidad de Stanford, corroboraba esa respuesta plausible. Las mutaciones que afectaban al gen *Ubx*, por ejemplo, y que transformaban simultáneamente el tercer segmento torácico y el primero abdominal, se daban en las secuencias codificantes de dicho gen; eliminaban, por tanto, la función de la proteína. Por contra, las mutaciones *bithorax* o *postbithorax* estudiadas por Lewis alteraban zonas reguladoras del gen.

Había, pues, tres genes en el com-



5. ESQUEMA DE RECOMBINACION MITOTICA inducida por rayos X. A la izquierda se ilustra una célula heterozigótica para la mutación homeótica *Ubx* y para una mutación cuticular (*m*), que sirve para marcar el clon de células mutantes. Se representan las dos cromátidas de cada cromosoma homólogo (*cada uno de un color distinto*), unidas por el centrómero respectivo (*círculos de color rojo o azul*); la recombinación mitótica entre cromátidas de cromosomas homólogos se indica por el dibujo en aspa. Tras la mitosis, una de las posibles segregaciones de cromátidas conduce a la formación de una célula homozigótica para el marcador *m* y para la mutación *Ubx* (*derecha*). La otra célula no posee ninguna de estas dos mutaciones. La célula mutante dará lugar, tras sucesivas mitosis, a un clon de células deficientes para *Ubx*, reconocibles por la mutación cuticular *m*, y que mostrará un determinado fenotipo en el adulto.



6. CLON DE CELULAS MUTANTES en el gen *Abd-B*. En la parte izquierda del octavo segmento abdominal se muestra su estructura cuticular normal, con apenas unas pocas cerdas pequeñas. En la parte derecha se ha inducido un clon por recombinación mitótica (*señalado con un asterisco*), mutante para *Abd-B* y con los marcadores cuticulares *yellow* y *forked*, que producen cerdas amarillas y retorcidas. La falta del gen *Abd-B* tranforma el grupo de células mutantes del clon en células con características del cuarto segmento abdominal, razón por la cual estas células desarrollan cerdas y cutícula propia de este segmento cuarto en el octavo.

plejo *bithorax*; cada uno especificaba un grupo de segmentos (su dominio de acción). Y había una serie de secuencias reguladoras, una para cada segmento, que controlaban la expresión de los tres genes en su dominio respectivo. Además, los estudios moleculares confirmaron otro aspecto del análisis genético de Lewis: las mutaciones del C-BX, afectaran a secuencias reguladoras o codificantes, se alineaban en el cromosoma de acuerdo con los segmentos que transformaban en el eje anteroposterior.

Todos estos descubrimientos parecían limitarse a transformaciones extrañas sufridas por el díptero. Pero la investigación reciente ha revelado, para nuestra sorpresa, que gran parte de los mecanismos biológicos se conservan en organismos diferentes. Uno de los grupos de genes que mejor encaja con tales resultados es, precisamente, el de los genes homeóticos.

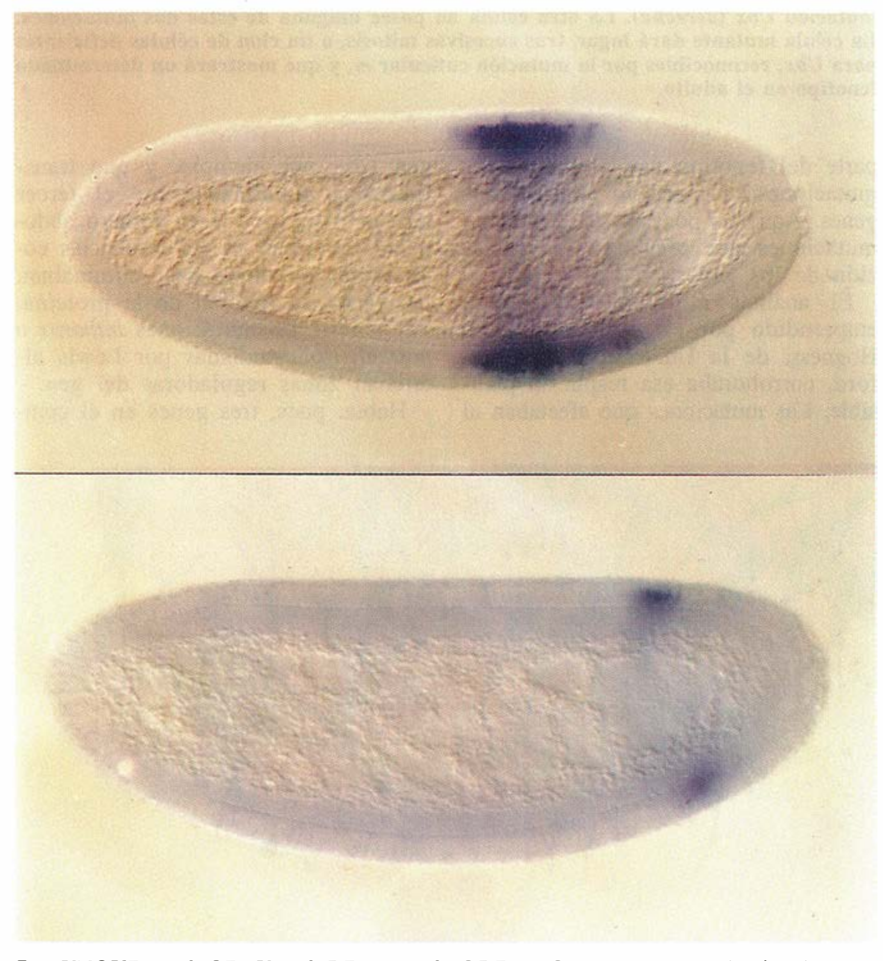
La principal revelación llegó con el descubrimiento de que existía una secuencia de 180 pares de bases, integrada en las zonas codificantes, que se mantenía en distintos genes de los complejos homeóticos de *Drosophila*. Llamada por ello secuencia homeótica ("homeobox"), se la encontró posteriormente en otros genes implicados en el desarrollo de *Drosophila* y de muchas otras especies, vertebrados incluidos. Todos los genes de los complejos homeóticos de *Drosophila* poseen esa secuencia. Así pues, en consonancia con el análisis genético, hay tres secuencias homeóticas en el complejo *bithorax*, una por cada gen.

El descubrimiento de la secuencia homeótica abrió el camino para el aislamiento y estudio de genes similares en organismos diversos. Se observó que las discrepancias en el seno de las distintas secuencias homeóticas de genes diferentes permitían reconocer genes homólogos (de origen evolutivo común) en la inmensa mayoría de metazoos. Entre los genes aislados y caracterizados había genes homólogos a los homeóticos del complejo *bithorax* y del complejo *Antennapedia* de *Drosophila*. Con asombro se comprobó que, en el ratón, los genes homólogos a los de los complejos *bithorax* y *Antennapedia* de *Drosophila* se encontraban agrupados en una misma posición del cromosoma, igual que en el díptero y en idéntico orden que en éste. Pero había dos diferencias significativas entre ratón y *Drosophila*; en el múrido, los genes homólogos a los de los complejos *bithorax* y *Antennapedia* se encontraban juntos, no divididos en dos grupos, y existían cuatro complejos homeóticos, no uno solo. Cada complejo contenía, en sí mismo, casi todos los genes homólogos a los de los dos complejos de *Drosophila* juntos. Esta situación se extiende al resto de los vertebrados, incluido el hombre: poseemos los genes homeóticos de *Drosophila* repetidos cuatro veces.

La mayor sorpresa surgió, sin embargo, cuando se estudió la disposición de los genes y su expresión en el embrión de ratón. Denis Duboule y Pascal Dollé, del Laboratorio de Genética Molecular de Eucariotas de Estrasburgo, y el grupo de Robb Krumlauf, del Instituto Nacional de Investigación Médica en Londres, descubrieron la misma relación desentrañada en *Drosophila*: los genes que se encontraban en un extremo de cada uno de los cuatro complejos del ratón se expresaban en posiciones anteriores del embrión de ratón, mientras que los que aparecían en el otro extremo se expresaban en las zonas posteriores.

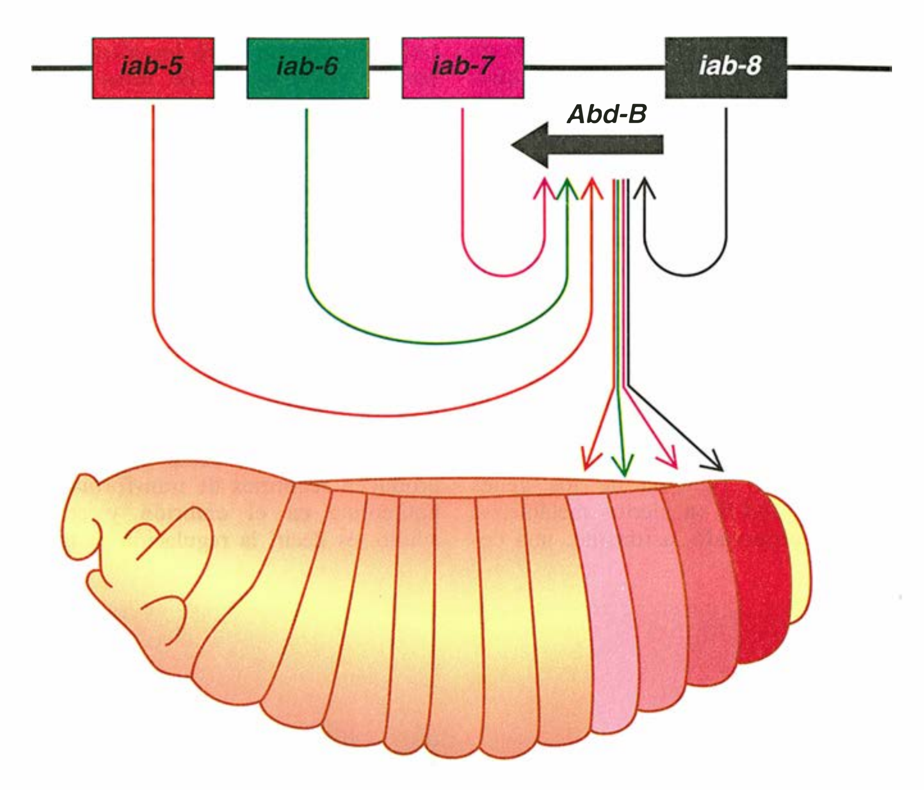
Se reproducía así la relación, descubierta en *Drosophila*, entre la ubicación de los genes en el cromosoma y las regiones del eje anteroposterior donde se expresaban dichos genes. Las transformaciones observadas en ratones mutantes en algunos de tales genes han confirmado el papel principal de éstos en el desarrollo diferencial de estructuras en el eje anteroposterior. Esta similitud entre las formas de expresión de los genes implicados en la determinación del eje resalta aún más si consideramos el tipo tan distinto de desarrollo seguido por el ratón y por la mosca del vinagre.

Se han descubierto complejos homeóticos en organismos muy dispares: cnidarios, nematodos, planarias, etc. La retención de genes homeóticos homólogos en especies tan alejadas desde el punto de vista filogenético y con modos de desarrollo tan diferentes induce a suponer que el complejo homeótico surgió hace entre 600 y 1000 millones de años. La función del complejo podría ser la de establecer diversidad en el eje anteroposterior de los metazoos primitivos. Diríase que esta función ha



7. AUNQUE LAS CELULAS DEL BLASTODERMO no muestren ningún signo de diferenciación, los genes homeóticos presentan una expresión restringida en el eje anteroposterior. En la fotografía superior se ilustra la expresión del ARN del gen *abdominal-A* y en la inferior la del gen *Abdominal-B*.

8. ORGANIZACION DEL GEN *Abdominal-B*. Hay una serie de secuencias reguladoras (secuencias *iab*) que controlan la expresión de *Abdominal-B* con distinta intensidad en los segmentos abdominales quinto a octavo. Estas diferencias en la cantidad de producto originan las diferencias morfológicas en estos segmentos.



persistido, si bien adaptada al desarrollo peculiar de organismos muy dispares.

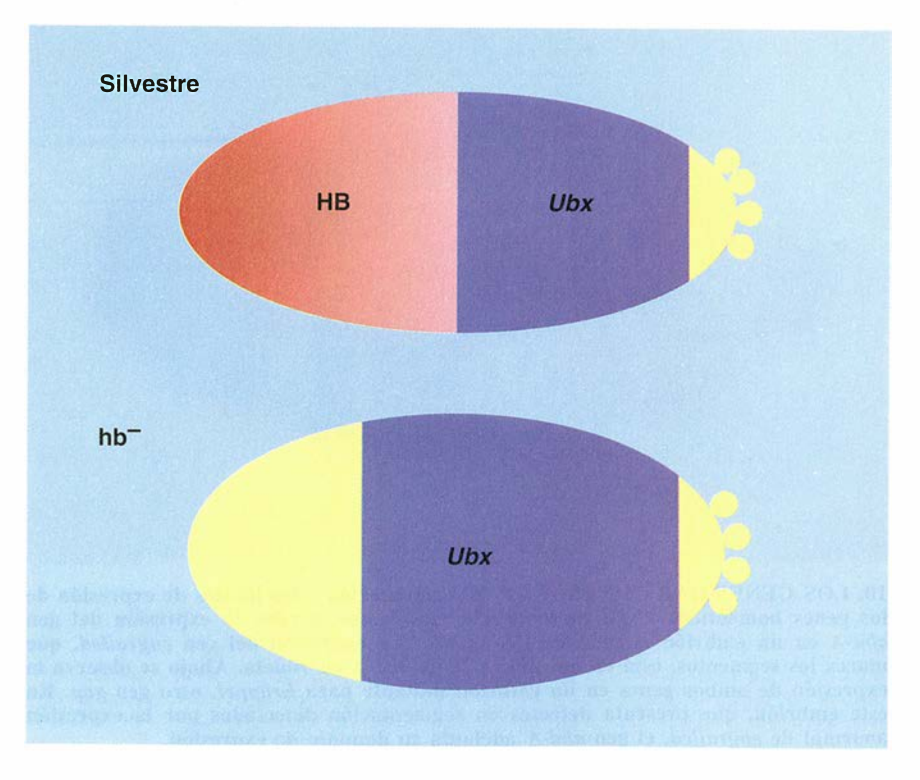
Pero las semejanzas no acaban ahí. Los trabajos experimentales en que se introducían genes de ratón o humanos en *Drosophila*, realizados por el grupo de William McGinnis, de la Universidad de Yale, han sacado a la luz una homología funcional de las proteínas codificadas por estos genes. Es decir, los genes homeóticos de ratón o humanos operan hasta cierto punto en *Drosophila* igual que si se tratara de los propios genes homólogos de la mosca. El estudio de estos genes en *Drosophila* podría, pues, aportar información sobre el desarrollo de una amplia gama de especies, hombre incluido. Nosotros hemos centrado nuestro trabajo en el análisis del complejo *bithorax* de *Drosophila*.

Sabemos ya que el C-BX consta de tres genes, cuya expresión viene gobernada por una serie de secuencias reguladoras. Podemos seguir el control de estos genes en los diferentes segmentos del embrión atendiendo a la expresión del ARN o de la proteína correspondiente. Al igual que otros grupos de diferentes laboratorios, hemos estudiado dicha expresión durante el desarrollo.

El embrión de *Drosophila* se desarrolla en sólo 24 horas. Comienza luego la etapa larvaria. La larva formará una pupa que, tras la metamorfosis, se convertirá en el individuo adulto. En las primeras horas del desarrollo embrionario, los núcleos, que forman un sincitio, se dividen y migran a la periferia constituyendo, a las tres horas, un blastodermo. En él se produce la formación de membranas que delimitan las células. La expresión de los genes homeóticos comienza en este estadio de blastodermo celular, transcribiéndose en zonas discretas del eje anteroposterior. Esta expresión temprana indica que, aunque no existe diferenciación morfológica en las células del blastodermo (salvo en las células que originarán la línea germinal), los destinos de diferentes células están ya determinados.

Durante el desarrollo posterior del embrión se forman los surcos que delimitan los segmentos del tórax y el abdomen. La transcripción de los genes del complejo *bithorax* durante estos estadios finales embrionarios coincide con los metámeros transformados por las mutaciones acaecidas en dichos genes. Esta expresión ocurre en diferentes grupos de segmentos para cada gen, se solapa en los segmentos posteriores y presenta límites de expresión definidos en los anteriores.

¿Qué relación existe entre las mutaciones *bithorax* y *postbithorax* (u



9. LOS GENES *GAP* controlan los límites anterior y posterior de la expresión inicial de los genes homeóticos. Arriba, un blastodermo normal de *Drosophila* expresa el gen *hunchback* en la parte anterior (*rojo*), que actúa a modo de represor del gen *Ubx*. El dominio donde se transcribe el gen *Ubx* se señala en azul. Abajo se representa un blastodermo mutante para el gen *hunchback*. Al faltar el producto de este gen, la expresión de *Ubx* se extiende anteriormente.

otras similares) y los patrones de expresión? O lo que es lo mismo, ¿cómo controlan las secuencias reguladoras la expresión de los diferentes genes del C-BX?

Para estudiar el efecto de diferentes mutaciones en sus zonas reguladoras, empleamos anticuerpos específicos contra las proteínas de los genes *abd-A* y *Abd-B* del complejo *bithorax*, responsables de la diversidad segmental del abdomen. Hemos comprobado que las mutaciones en estas regiones infraabdominales (*iab*) producen una falta de expresión o una variación en los niveles de ARN mensajero o proteína de los genes *abd-A* o *Abd-B* en ciertos metámeros. Hemos observado, asimismo, una correlación precisa entre los efectos sobre la transcripción de estos genes en un determinado segmento y su transformación consiguiente. Una relación similar se había puesto de manifiesto anteriormente para las secuencias reguladoras del gen *Ubx*: las mutaciones de tipo *bithorax* o *postbithorax* modificaban la expresión de los productos del gen en diferentes segmentos; ahí residía la causa de los fenotipos encontrados.

A propósito de ese control de los genes homeóticos, conviene hacer dos consideraciones. En primer lugar, las mutaciones en las zonas reguladoras producen fenotipos de transformación homeótica en el embrión y en el adulto, es decir, la regulación se mantiene durante todo el desarrollo. En segundo lugar, las transformaciones ocurren entre parasegmentos, metámeros constituidos por la parte posterior de un segmento y la anterior del segmento siguiente.

La organización parasegmental de *Drosophila* fue determinada por Peter Lawrence y Alfonso Martínez-Arias, del Laboratorio de Biología Molecular en Cambridge. En general, las transformaciones homeóticas en el complejo *bithorax* y la propia expresión de sus genes son parasegmentales. La estructura general del C-BX es la de una sucesión de secuencias reguladoras con especificidad parasegmental, que controlan la expresión de los genes del complejo. La combinación específica de estos tres genes con sus niveles y distribución particulares determinan la peculiar morfología de cada segmento.

Habida cuenta de la expresión continua de los genes homeóticos durante el desarrollo y en diferentes tejidos, es de presumir una gran complejidad en las regiones de control. Suposición que se corrobora al comprobar que, de las 300 kilobases que constituyen el complejo, no llegan a 15 las que se transcriben en ribonucleótidos mensajeros determinantes de proteína. Estas zonas reguladoras se extienden a lo largo de grandes regiones del ADN, lo mismo en posición 3' que 5', respecto a las unidades de transcripción, algunas incluso a más de 50 kilobases del promotor que controlan. Importa averiguar, a este respecto, de qué modo las secuencias reguladoras inducen la transcripción de un gen determinado en un segmento específico, es decir, cómo "saben" cuál es el segmento en el que deben "actuar" y en qué otros deben mantenerse "silenciosas".

La solución de este problema se halla vinculada a la de otra cuestión. Si las secuencias son específicas de cada metámero, ¿cómo se acoplan los dos procesos, el que forma los segmentos (o parasegmentos) en el embrión de *Drosophila* y el que dicta la expresión local de los genes homeóticos, de suerte tal que segmentos y expresión de genes coincidan con precisión?

Una solución podría ser que *Drosophila* utilizase los mismos genes en ambos mecanismos, el de formación de segmentos y el de control de la transcripción de genes homeóticos. Así es. Los dos procesos requieren los genes de segmentación, estudiados en los años ochenta por Christianne Nüsslein-Volhard y Eric Wieschaus, del laboratorio EMBO en





10. LOS GENES GAP CONTROLAN la segmentación y los límites de expresión de los genes homeóticos. Para corroborarlo mostramos, arriba, la expresión del gen *abd-A* en un embrión normal de *Drosophila*. La expresión del gen *engrailed*, que marca los segmentos, está en naranja, y la de *abd-A* en violeta. Abajo se observa la expresión de ambos genes en un embrión mutante para *Krüppel*, otro gen *gap*. En este embrión, que presenta defectos en segmentación detectados por la expresión anormal de *engrailed*, el gen *abd-A* adelanta su dominio de expresión.

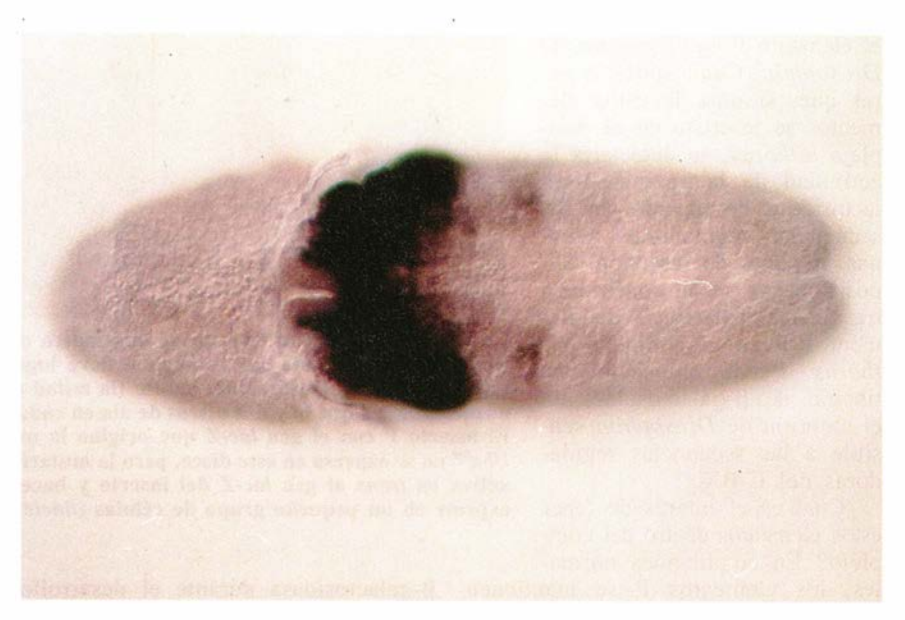
Heidelberg. Se trata de genes necesarios para la formación de segmentos en el embrión y para la transcripción correcta de los genes homeóticos. En este contexto, el grupo de genes *gap*, requeridos para la formación de regiones continuas del embrión de *Drosophila*, son necesarios también para establecer los límites de expresión de los genes homeóticos, control que se realiza a través de las secuencias reguladoras específicas de cada gen.

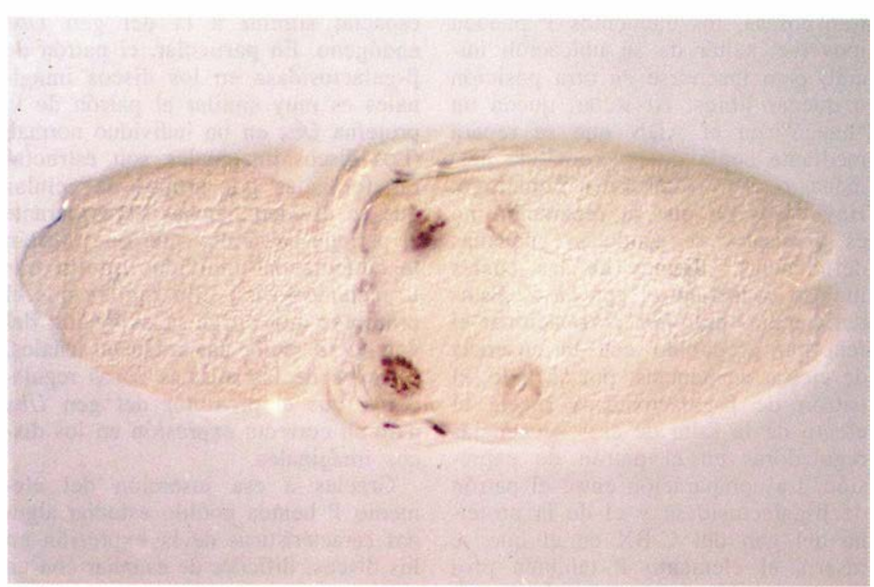
Nosotros hemos analizado la expresión de los genes *abd-A* y *Abd-B* del complejo *bithorax* en diferentes embriones mutantes para los genes gap. Investigamos, asimismo, el modo en que las secuencias reguladoras controlaban dicha expresión. Observamos, por ejemplo, que el límite anterior de expresión de los genes *Ubx* o *abd-A*, normalmente situado hacia la mitad del embrión, se adelantaba en el caso de embriones mutantes para dos genes *gap* —*Krüppel* y *hunchback*— que se expresan en la mitad anterior del embrión. Por tanto, los productos de los genes *Krüppel* y *hunchback* delimitan, desde muy temprano en el desarrollo embrionario, los bordes anteriores de *Ubx* y *abd-A*. Otros genes de segmentación son necesarios para activar los genes homeóticos. En ausencia del gen *tailless*, que se transcribe en la parte posterior del embrión, la expresión del gen *Abd-B* prácticamente desaparece. La distribución discreta de estos genes de segmentación en el blastodermo condiciona, por tanto, los límites de expresión de los genes homeóticos.

Según hemos señalado ya, el efecto de los genes de segmentación se ejerce a través de las secuencias reguladoras de los genes homeóticos. Con el fin de ahondar en ese proceso hemos analizado individuos doblemente mutantes: para los genes de segmentación y para secuencias reguladoras de los genes del C-BX. Estos individuos se pueden teñir con anticuerpos específicos contra los productos de los genes *abd-A* o *Abd-B* y estudiar su expresión en embriones. Si el efecto resultante de la falta de función del gen de segmentación se ejerce a través de la secuencia reguladora de *abd-A* o *Abd-B* mutada, la expresión de estos genes diferirá de la manifestada cuando la secuencia está intacta. Sumada a otros procedimientos, esta serie de dobles combinaciones mutantes ha permitido acotar las secuencias reguladoras que los genes *gap* activan o reprimen; activación o inhibición que determina la expresión de los genes *abd-A* y *Abd-B*. En definitiva, los genes *gap* y otros implicados en la segmentación realizan los dos procesos antes descritos: controlan la formación de los segmentos y delimitan la expresión de los genes homeóticos en el eje anteroposterior.

Aunque los genes homeóticos se requieren en el embrión, larva y adulto, los genes de segmentación que controlan su transcripción inicial sólo se expresan durante las primeras horas de desarrollo embrionario. El control posterior se realiza mediante dos grupos de genes con acción antagónica sobre la expresión de los genes homeóticos: los genes del grupo *Polycomb* impiden su expresión en las células donde inicialmente no se transcriben (de acuerdo con los límites determinados por los genes de segmentación), mientras que los genes del grupo *trithorax* se encargan de mantener la transcripción inicial. Las mutaciones en los genes del primer grupo levantan la represión de la transcripción de los genes homeóticos; las lesiones en los del segundo grupo disminuyen o eliminan la expresión de los mismos. Ambos tipos de mutaciones producen transformaciones entre segmentos en el embrión o adulto, aunque de signo opuesto.

Hemos emprendido el estudio de la estructura del complejo *bithorax* a través de un nuevo método que puede arrojar luz sobre la importancia del orden de secuencias reguladoras

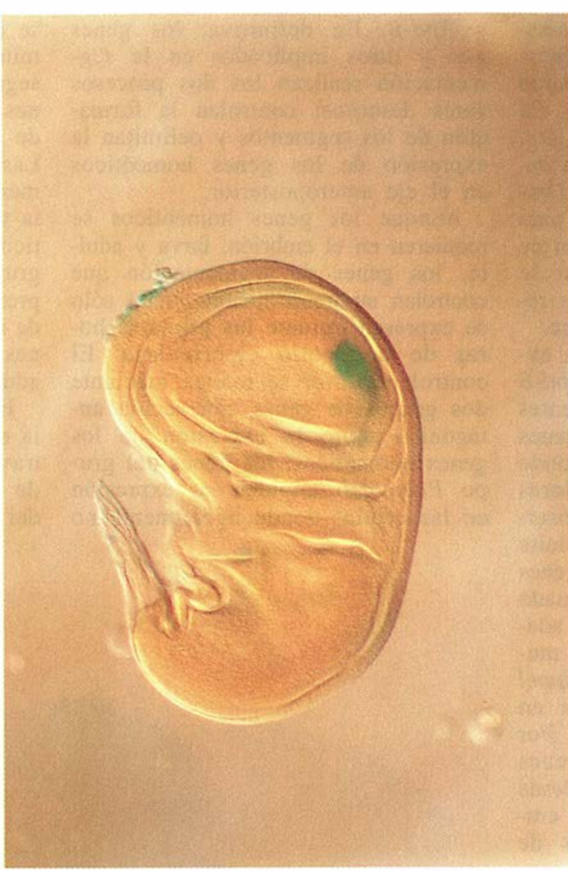




11. EXPRESION del gen *Abd-B* en los segmentos posteriores de un embrión normal (*figura superior, vista desde arriba*). En la parte inferior se ofrece un embrión mutante para *tailless*, teñido con un anticuerpo contra la proteína *Abd-B*. La señal está muy reducida en comparación con el embrión normal; ello nos indica que se requiere un gen *gap*, *tailless*, para activar *Abd-B*.

y sobre su función. El método se basa en el uso de elementos P, que son elementos transponibles que se insertan al azar en el genoma de *Drosophila*.

Existen elementos P modificados que portan cierto gen bacteriano, el *lac-Z*, sometido al control de un promotor mínimo, que no confiere ninguna expresión específica. El gen *lac-Z* codifica la enzima β-galactosidasa, cuya actividad puede detectarse mediante cierta reacción química que da un color azul. Se ha demostrado que el promotor mínimo responde a las secuencias reguladoras que se encuentran cercanas al lugar donde se inserta el elemento P en el genoma de *Drosophila*. Cabía, pues, esperar que, si uno de estos elementos se insertara en el complejo *bithorax*, se detectaría la actividad de la enzima β-galactosidasa, de acuerdo con las secuencias reguladoras cercanas al punto de inserción. Suposición que se ha confirmado tras aislar inserciones de elementos P en el complejo *bithorax*. Puede obtenerse una tinción de β-galactosidasa en el embrión de *Drosophila* sensible a las secuencias reguladoras del C-BX.



12. DISCO IMAGINAL de ala de una mosca de genotipo Cbx^{1}/ Ubx^{lac}. Este disco imaginal dará lugar a las estructuras del mesotórax del adulto (la mitad derecha o izquierda, ya que hay dos discos de ala en cada larva). El inserto P con el gen *lac-Z* que origina la mutación Ubx^{lac} no se expresa en este disco, pero la mutación Cbx^{1} activa en *trans* al gen *lac-Z* del inserto y hace que se exprese en un pequeño grupo de células (*tinción azul*).

¿Cuál es el interés de tener estos elementos dentro del complejo? En condiciones normales, los elementos P se mantienen estables. Pero si se activa la enzima transposasa, los elementos P pueden moverse, saltar de su ubicación inicial, para insertarse en otra posición o quedar libres. Al saltar, queda un "hueco" en el ADN que se repara mediante copia de la cromátida hermana o del cromosoma homólogo. Hay casos en que la reparación no es precisa y se producen pequeñas deficiencias, algunas de las cuales incluso conservan el gen *lac-Z*. Estas deficiencias permiten correlacionar el fenotipo producido con la ausencia de ciertas secuencias; por su lado, el patrón de β-galactosidasa revela el efecto de la falta de esas secuencias reguladoras en el patrón de expresión. La comparación entre el patrón de β-galactosidasa y el de la proteína del gen del C-BX en el que se inserta el elemento P también proporciona información sobre la acción de las secuencias reguladoras.

Un elemento P se ha insertado en un intrón —secuencia no codificadora— del gen *Ubx*. La expresión de β-galactosidasa durante el desarrollo embrionario presenta una distribución espacial similar a la del gen *Ubx* endógeno. En particular, el patrón de β-galactosidasa en los discos imaginales es muy similar al patrón de la proteína *Ubx* en un individuo normal. (Los discos imaginales son estructuras formadas por grupos de células que se dividen muchas veces durante el período larvario y que constituirán la cutícula del individuo adulto tras la metamorfosis.) Ello sugiere que el promotor que dirige la expresión del gen *lac-Z* recibe las mismas señales, a través de las mismas zonas reguladoras, que el promotor del gen *Ubx* para su correcta expresión en los discos imaginales.

Gracias a esa inserción del elemento P hemos podido estudiar algunas características de la expresión en los discos, difíciles de estudiar con un anticuerpo contra la proteína *Ubx*. Así, la inserción del elemento P en uno de los dos cromosomas homólogos permite abordar las interacciones producidas por mutaciones en el otro cromosoma, es decir, interacciones en *trans*. Cualquier efecto de este tipo se detecta por una tinción específica de β-galactosidasa. Más difícil, resulta investigar dichas interacciones en individuos que no portan la inserción del elemento P, pues cuesta distinguir los productos del gen *Ubx* derivados del cromosoma en que se encuentra la mutación (interacción en *cis*) de los que provienen del cromosoma homólogo (interacción en *trans*).

La elucidación de los mecanismos subyacentes en el desarrollo constituye uno de los principales retos que debe acometer la biología. En los últimos años se ha comprobado que varios de esos mecanismos básicos son comunes a especies muy alejadas desde el punto de vista filogenético. Entre los genes homólogos implicados en el desarrollo que persisten en organismos muy distantes entre sí se encuentra el grupo de genes homeóticos que determinan diferencias en el eje anteroposterior. El C-BX de *D. melanogaster* ha servido de modelo de inspiración para otras hipótesis sobre pautas de desarrollo aplicables a diferentes especies. Las conclusiones a las que aquel modelo llega respecto a la organización de genes y secuencias reguladoras, función de los genes, etc., en el díptero podrían ser válidas para los vertebrados, hombre incluido.

En el horizonte se divisa otro reto: conocer por qué los genes homólogos que controlan regiones discretas en el eje anteroposterior de los animales, crean la amplia diversidad de estructuras que conforman el abdomen de *Drosophila*, el tronco de vertebrados y el cuerpo del gusano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETIC ORGANIZATION OF *DROSOPHILA* BITHORAX COMPLEX. E. Sánchez-Herrero, I. Vernós, R. Marco y Ginés Morata. En *Nature*, vol. 313, págs. 108-113; 1985.

THE BITHORAX COMPLEX: CONTROL OF SEGMENTAL IDENTITY. M. Peifer, F. Karch y W. Bender. En *Genes. Dev.*, vol. 1, páginas 891-898; 1987.

THE BITHORAX COMPLEX. I. Duncan. En *Ann Rev Genet*, vol. 21, págs. 285-319; 1987.

THE MAKING OF A FLY. P. A. Lawrence. Blackwell Scientific Publications; 1992.

ARQUITECTOS MOLECULARES DEL DISEÑO CORPORAL. W. McGinnis y M. Kuziora en *Investigación y Ciencia*, vol. 211, págs. 22-28; abril, 1994.

Nacimiento y muerte de la nova V1974 Cygni

La nova más brillante de los últimos 17 años aclaró, mientras vivió, muchos interrogantes. Tras su muerte, planteó bastantes más

Sumner Starrfield y Steven N. Shore

Jamás se habían dedicado tantos astrónomos ni tantos instrumentos al estudio de una nova. Desde el día en que explotó V1974 Cygni, a principios de 1992, se la ha observado en todas las frecuencias, de las ondas de radio a los rayos X, en tierra, en el aire, en órbita y más allá. En su primer año la erupción arrojó gases encendidos cuya evolución se ajustó a las predicciones aventuradas por los modelos teóricos veinte años atrás. De forma inesperada, en su segundo año, la nova se apagó. Aún seguimos preguntándonos la razón de tan corta vida.

Peter Collins avistó la explosión a primeras horas de la mañana del 19 de febrero de 1992. Algunas horas después observábamos la nova con el satélite *Explorador Internacional en el Ultravioleta* (*EIU*). La detectamos en su fase de "bola de fuego", una imagen que nos es familiar gracias a las fotos de explosiones de bombas de hidrógeno tomadas en el momento en que los gases comienzan a expandirse. En poco tiempo vino a ser la única nova a la que se ha visto nacer y morir. A finales de 1993, los rayos X de baja energía procedentes de su núcleo dejaron de percibirse: la explosión nuclear se había quedado sin combustible.

V1974 Cygni confirmó muchas de las ideas que se tenían sobre las novas, por ejemplo, la evolución seguida por los gases eyectados; pero también redujo a la nada otros conceptos bien arraigados. El objeto arrojó 10 veces más materia de lo previsto, parte de ella en forma de nudos densos y filamentos. Los nudos, que podrían encerrar la clave para determinar la causa del exceso de masa, denuncian la existencia de procesos turbulentos que podrían haber drenado la materia del núcleo de la nova.

La primera nova reconocida como una explosión fue T Aurigae, gracias a las peculiaridades de su espectro en comparación con el de las estrellas normales. Ocurrió en 1892. Desde entonces se han detectado y estudiado una o dos novas cada año. Una nova "al alcance de la vista" como V1974 Cygni, es decir, con el brillo suficiente para que se la pueda observar sin ayuda de telescopio, aparece quizás una vez por década.

Hace unos 40 años empezaron a encajar las piezas de la hipótesis sobre la creación de novas. En 1954, Merle F. Walker descubrió que la vieja nova DQ Herculis (cuya explosión ocurrió en 1934) era un sistema de dos estrellas en órbita mutua. Una de las estrellas de ese sistema binario pasa por delante de la otra; gracias a ello cabe medir el tiempo que tarda cada estrella en describir su órbita alrededor de la otra. Este período es brevísimo: cuatro horas y 39 minutos. Además, una de las estrellas es muy pequeña; ahora sabemos que se trata de una enana blanca.

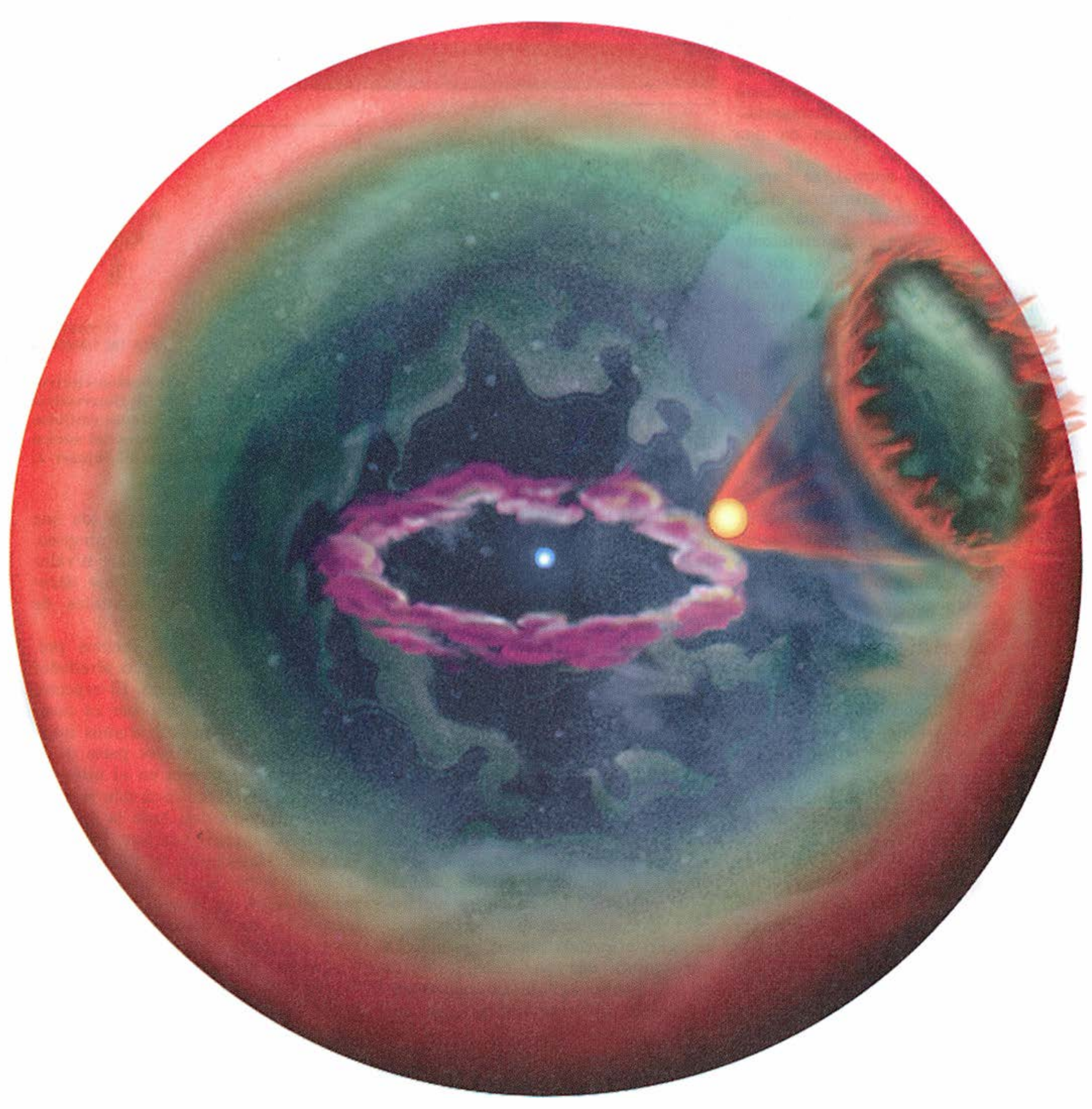
Las enanas blancas son el producto final de la evolución estelar; hay en ellas tanta materia como en el Sol, pero en un volumen no mayor que el de la Tierra. Robert P. Kraft demostró que también otras novas de edad avanzada eran sistemas binarios cuyos integrantes giran muy cerca el uno del otro. En todas estas binarias, una era bastante mayor y poco evolucionada y la otra una enana blanca. Pero, ¿cómo pueden una enana blanca, que no cuenta con combustible nuclear, y su compañera, una estrella estable, detonar una explosión cuya intensidad supera en 10.000 veces el brillo del Sol? Porque cada estrella altera inexorablemente el desarrollo de la otra.

Un sistema de nova es, al principio, una binaria cuyas estrellas componentes se encuentran separadas y tienen masas distintas. La mayor evoluciona más deprisa y convierte su hidrógeno en helio en un ciclo CNO de reacciones nucleares, del que forman parte el carbono, el nitrógeno y el oxígeno. Al finalizar esa fase, se transforma en una gigante roja; su superficie se expande y se traga a la estrella menor. Mientras tanto, la estrella de mayor masa convierte en carbono y oxígeno el helio de su núcleo.

Las estrellas prosiguen en su mutua rotación, dentro de la envoltura gaseosa común, perdiendo energía orbital y momento angular en favor del gas. En virtud de ello, el sistema va desprendiéndose del gas, y las estrellas, en su giro, caen una hacia la otra; al final se pierde toda la materia que se extendía desde la estrella de mayor masa hasta más allá de la otra. Cuando termina la evolución de esta envoltura común, las estrellas que antes orbitaban a una distancia considerable se han convertido en un sistema binario de componentes muy próximos. La estrella grande ha consumido su combustible y se ha transformado en una compacta enana blanca. Su compañera permanece inalterada.

Supongamos que las estrellas estaban en un principio aún más separadas y que la mayor empezó su vida con una masa comprendida entre ocho y doce masas solares; podría entonces convertir el carbono de su

SUMNER STARRFIELD y STEVEN N. SHORE siempre han sentido una especial fascinación por las explosiones. Starrfield se doctoró por la Universidad de California en Los Angeles y desde 1972 ha enseñado en la estatal de Arizona. Shore es catedrático del departamento de física y astronomía de la Universidad de Indiana en South Bend.



1. SUPERFICIE EN EXPLOSION de una enana blanca. Se arremolina alrededor de la estrella compañera para formar una bola de fuego. En las profundidades de los gases emitidos hay aglomeraciones de material denso (*rosa*), que seguramente proceden del interior de la enana blanca. La radiación de las reacciones nucleares que aún se producen sobre la enana blanca (*centro*) siguen calentando esos grumos hasta que se apaga la nova. Los gases expulsados continúan encendidos durante años.

núcleo en magnesio y neón, y la enana blanca en la que se transformaría se compondría de esos elementos pesados y no sólo de oxígeno y carbono (nova CO). Se habla entonces de enana blanca ONeMg.

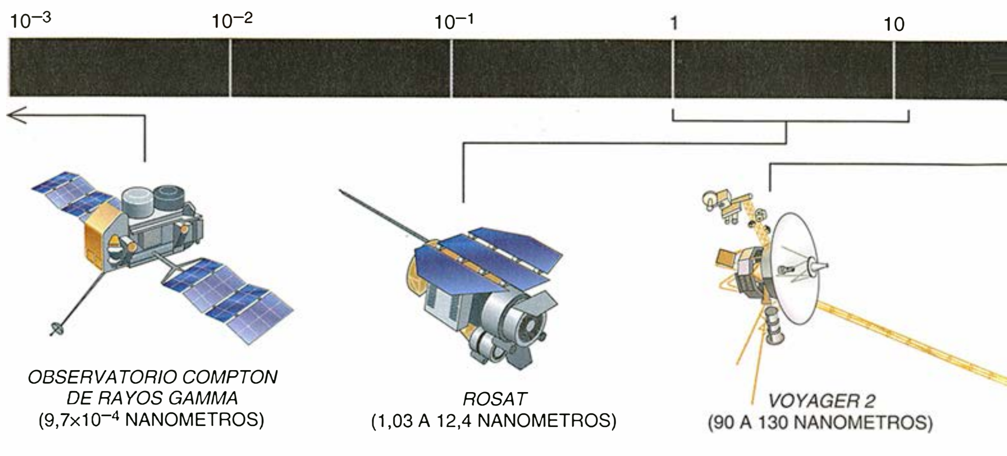
Kraft descubrió también que la estrella compañera pierde gas. Tras arremolinarse en un disco de acreción, el gas —rico en hidrógeno— cae sobre la superficie de la enana blanca. En 1972, uno de nosotros (Starrfield), junto con Warren M. Sparks, James W. Truran y G. Siegfried Kutter realizaron simulaciones por ordenador que mostraban de qué manera el gas de acreción detona la explosión subsiguiente.

La intensa gravedad de la enana blanca comprime el gas a medida que éste va cayendo sobre ella. Si su superficie acumula una cantidad de gas cuya masa centuplique la de la Tierra, la densidad de la capa inferior será de más de 10.000 gramos por centímetro cúbico. (La densidad del agua es de un gramo por centímetro cúbico.) Debido a que el gas está comprimido, su temperatura alcanzará varios millones de grados kelvin. Además, el proceso de acumulación provoca que la materia del núcleo de la enana blanca se mezcle con las capas superiores y con las que van cayendo.

En estas condiciones, los núcleos de hidrógeno se convierten en helio y liberan energía por el mismo mecanismo con el que las reacciones

nucleares de CNO suministran energía a las estrellas normales. El material se calienta aún más, con lo que se acelera la fusión y se crean reacciones termonucleares desbocadas, como las que se producen en una bomba de hidrógeno.

Si el gas fuera normal, se expandiría y enfriaría, y terminaría la fusión. Pero el material de una enana blanca presenta un comportamiento peculiar que viene descrito por la mecánica cuántica. La materia está confinada en un espacio tan reducido, que los electrones, que no pueden penetrar unos en otros, se convierten en la fuente de la presión. La materia se calienta, mas, a diferencia del gas normal, no se expande ni enfría, y la radiación tampoco puede evacuar el calor con la suficiente rapidez.



2. BATERIA DE INSTRUMENTOS empleados en el estudio de la radiación electromagnética emitida en diferentes longitudes de onda por V1974 Cygni. El *Observatorio Compton de Rayos Gamma* se dedicó a la búsqueda (sin éxito) de los fotones emitidos por el isótopo de sodio ^{22}Na. El satélite *ROSAT* detectó rayos X procedentes del núcleo encendido; la desaparición de estos rayos denunció la muerte de la nova. El *Voyager 2*,

La mezcla del carbono y el oxígeno del núcleo cataliza el ciclo de CNO y, por tanto, acelera la fusión, lo que termina por causar una explosión. La velocidad de las reacciones nucleares depende en gran medida de la temperatura; se vuelven de 10^{16} a 10^{18} veces más rápidas si la temperatura aumenta en un factor 10. Cuando la temperatura de las capas de acreción supera los 30 millones de grados kelvin, la materia empieza a mezclarse de forma turbulenta con las zonas superiores. La región mezclada crece hacia la superficie, y se lleva consigo calor y núcleos procedentes del interior. En pocos minutos, las capas superficiales explotan hacia el espacio, arrastrando productos de fusión y elementos del núcleo de la enana e intensificando a la vez su brillo de manera espectacular.

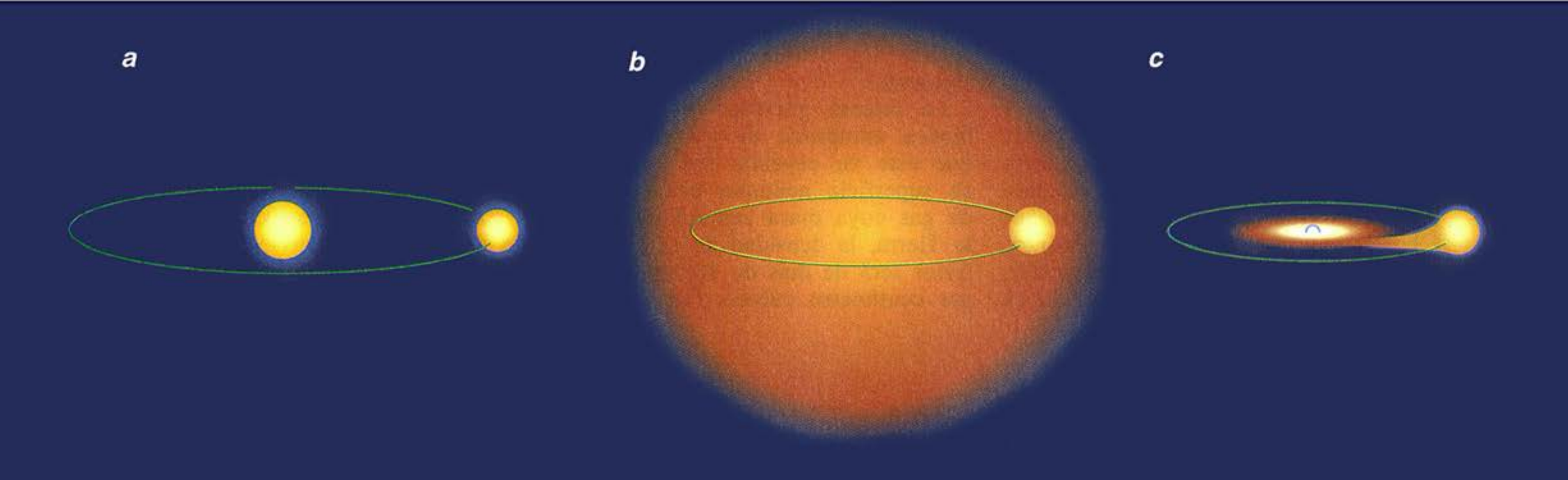
Nunca se han observado los primeros minutos de una explosión de nova, pero nuestras simulaciones predicen que la temperatura superficial puede superar el millón de grados kelvin; los gases calientes se expulsan a más de 5000 kilómetros por segundo. El gas se enfría con el repentino aumento de volumen. En pocas horas, la radiación emitida, que al principio era sobre todo de rayos X, pasa a ser ultravioleta, de menor energía. Al propio tiempo el área superficial del gas aumenta, lo que intensifica el brillo de la nova aun cuando ésta se vaya enfriando. A continuación se produce una transformación extraordinaria.

De partida, el caparazón en expansión es un gas caliente y denso, compuesto de electrones y iones (átomos desprovistos de uno o varios electrones). Este gas es bastante transparente, pero a medida que se expande su temperatura cae por debajo de los 10.000 grados kelvin. Los electrones empiezan a recombinarse con los iones para formar átomos a los que les falta sólo un electrón o ninguno. Estos átomos tienen muchos niveles de energía y pueden absorber decenas de millones de longitudes de onda diferentes.

Los átomos más absorbentes presentan un número atómico alrededor de 26, como el de hierro. El espectro de luz que pueden absorber es complejísimo. Estos iones y átomos impiden el paso de la mayor parte de la energía que se irradia en el ultravioleta, zona del espectro donde se emite en esta etapa casi toda la energía. Cuando estudiamos esta fase, junto con Peter H. Hauschildt, la llamamos el telón de acero. La energía absorbida por el telón se vuelve a emitir a longitudes de onda más largas (óptico e infrarrojo).

Nuestras primeras observaciones de V1974 Cygni corroboraron la existencia del telón de acero. A las pocas

3. UN SISTEMA DE NOVA es, al principio, un par de estrellas orbitantes muy alejadas entre sí (*a*). La estrella de mayor masa evoluciona más deprisa, convirtiéndose en una gigante roja y envolviendo a la estrella menor (*b*). Las estrellas pierden momento angular en favor del gas y van girando hasta juntarse mientras se expulsa el gas. Configuran, por fin, un sistema binario cuyas componentes están muy próximas y donde los restos del núcleo de la gigante roja, exhausto su combustible, se ha transformado en una enana blanca. La estrella de menor masa libera entonces parte de su materia, que origina un disco de acreción (*c*). Esta materia, al caer sobre la superficie de la enana blanca, se comprime mucho a causa del fuerte campo gravitatorio. Acontece entonces una reacción termonuclear desbocada —una explosión de nova— (*d*), que arrastra fuera de la enana blanca gran parte del material de acreción (*e*). Esta, sin embargo, puede causar la acreción de combustible procedente de su vecina de nuevo, y ambas pasarán repetidas veces por las fases de (*c*) a (*e*).



10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8

TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE
(120 A 190 NANOMETROS)

EXPLORADOR INTERNACIONAL EN EL ULTRAVIOLETA
(120 A 320 NANOMETROS)

OBSERVATORIO LOWELL
(400 A 700 NANOMETROS)

GRAN RED DE RADIOTELESCOPIOS
(10^7 A 10^9 NANOMETROS)

que por entonces se encontraba más allá de Neptuno, observó radiación del ultravioleta extremo por primera vez en una nova. *El Explorador Ultravioleta Internacional* detectó la explosión en su etapa inicial de bola de fuego. El *Telescopio Espacial Hubble* reveló la existencia de grumos dentro de los gases expulsados. El telescopio de 183 centímetros del observatorio Lowell, en Flagstaff, Nuevo México, registró la luz óptica, y la *Gran Red de Radiotelescopios*, en Socorro, Nuevo México, detectó emisiones en radio que confirmaron la presencia de las aglomeraciones de gas.

horas de su descubrimiento, George Sonneborn puso en marcha nuestro programa "Blanco Oportuno", que nos permite observar con el satélite *EIU* una nova brillante en cuanto se produce. Apuntó el satélite hacia la nova, y consiguió una serie de espectros en el ultravioleta.

Una hora más tarde observamos que el brillo de la nova en el ultravioleta había descendido ligeramente; su brillo óptico había aumentado. Los cambios astronómicos suelen medirse en miles de millones de años, y rara vez se registra evolución alguna en escalas de tiempo tan cortas. Al cabo de dos días, la radiación ultravioleta descendió hasta el 3 % de su valor inicial; durante todo ese tiempo, la nova fue aumentando su luminosidad óptica. En cuanto se produjo un pico en el brillo visual, la emisión en el ultravioleta tocó fondo y empezó a crecer.

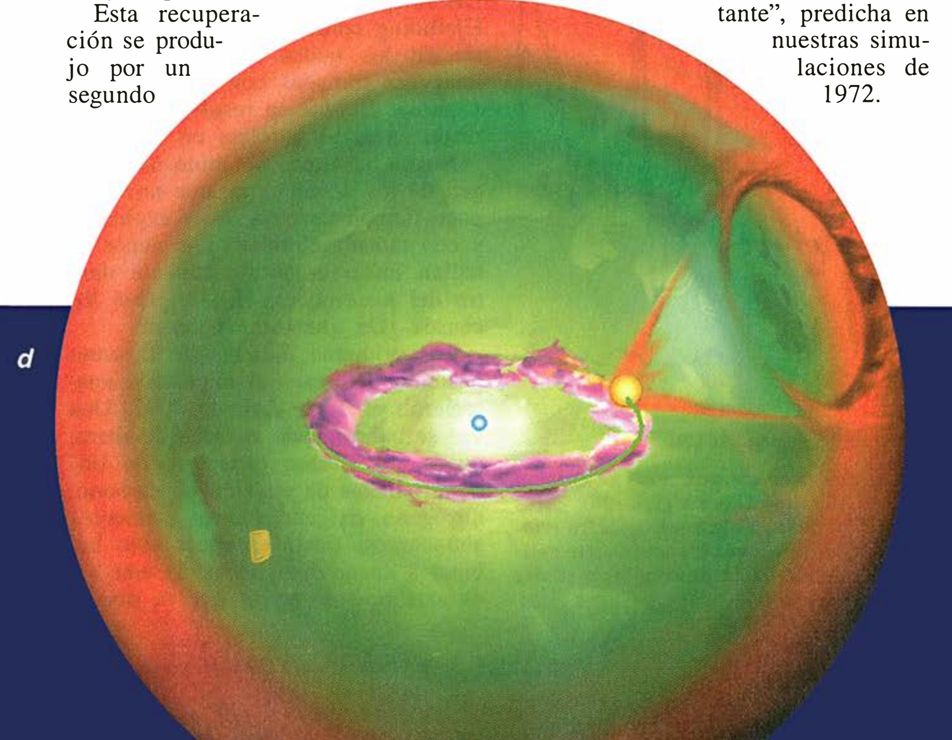
Esta recuperación se produjo por un segundo cambio en la ionización. A medida que el gas se expande, disminuye su densidad; los elementos del grupo de hierro van ionizándose de nuevo y se vuelven transparentes; en ese punto del proceso la radiación fluye desde el interior e intensifica la ionización y, por tanto, la transparencia del gas. Sube el telón de acero y la luz ultravioleta procedente de las capas calientes más profundas sobrepasa las capas exteriores. Al cabo de dos meses, el brillo ultravioleta había recuperado su valor inicial.

El aumento del brillo ultravioleta vino de la mano de un declive en el brillo visual de la nova. Sin embargo, el brillo total (o bolométrico) de la estrella subyacente se mantuvo casi constante. Con las observaciones de V1974 Cygni pudimos confirmar con todo detalle la existencia de esta fase de "luminosidad bolométrica constante", predicha en nuestras simulaciones de 1972.

Ronald S. Polidan, previendo que el pico de radiación seguiría desplazándose hacia longitudes de onda más cortas, solicitó que el *Voyager 2*, que en ese momento se encontraba allende la órbita de Neptuno, observase el espectro de V1974 Cygni. El 27 de abril de 1992 el satélite detectó la nova, la primera observada en el ultravioleta extremo; su brillo en esas longitudes de onda siguió creciendo durante las observaciones.

El pico de radiación fue desplazándose hacia longitudes de onda más cortas. El 22 de abril de 1992, Joachim Krautter, Hakki Ögelman y Starrfield empezaron a observar la nova con el satélite *ROSAT*. El espectro en rayos X era extremadamente débil, pero incluía fotones de muy alta energía (todavía no se ha podido determinar la procedencia de los fotones más energéticos). A lo largo del año siguiente, el brillo en rayos X de V1974 Cygni fue aumentando sin cesar, sobre todo a energías más bajas.

Daba la impresión de que había aparecido una nueva fuente de rayos X de luminosidad creciente. Estábamos viendo, a través de un caparazón cada vez más sutil de gas eyectado, la enana blanca caliente que había debajo. Al cabo de tres meses,



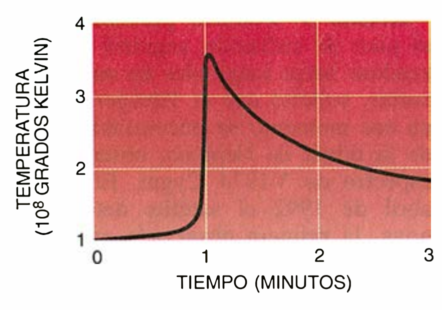
e

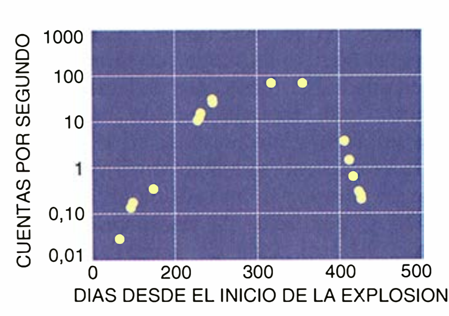
la nova se había convertido en la fuente más brillante de rayos X de baja energía de todo el firmamento.

Estas fuentes de rayos X las SSS, *supersoft sources* o fuentes superdébiles probablemente se mantienen durante décadas. La nova empezó a apagarse durante el verano de 1993; para el mes de diciembre de ese año, escapaba ya a la detección por el satélite *ROSAT*.

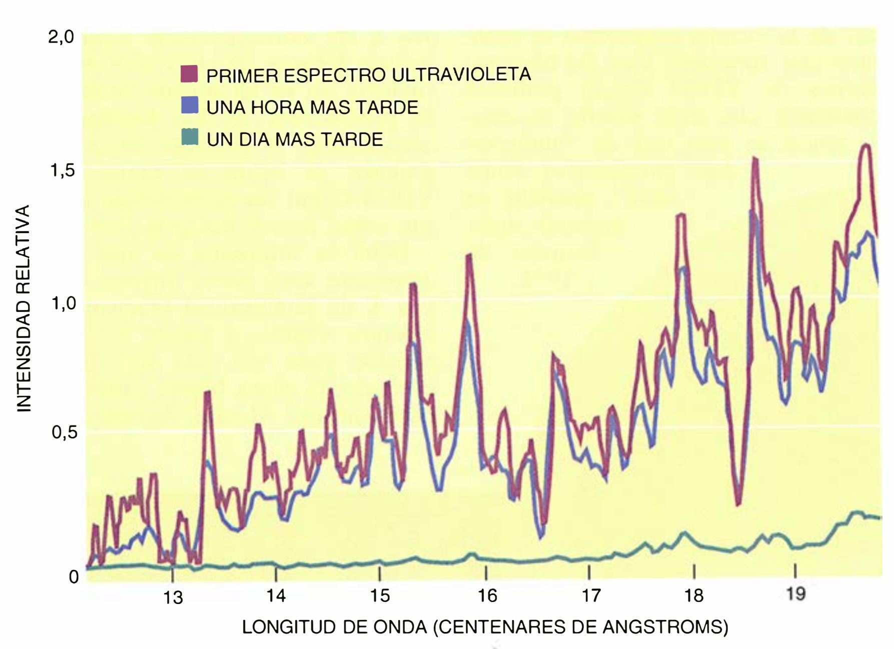
Pero pudimos continuar las observaciones con el *EIU*. Descubrimos que mermaba la cantidad de nitrógeno altamente ionizado: los iones se estaban recombinando con los electrones y formaban átomos menos ionizados. Además, los iones de nitrógeno que habían perdido cuatro electrones se recombinaban más deprisa que los que habían perdido tres. Al parecer ya no existía la intensa radiación que había despojado de sus electrones al nitrógeno; desde luego los rayos X no estaban ahí. Para nosotros, esta ausencia sólo podía significar que la enana blanca había consumido todo el combustible y que en su superficie ya no había fusiones nucleares.

La explosión de la nova duró unos 18 meses. La vida de una nova depende de la masa de la enana blanca a la que debe su existencia. Una enana blanca de gran masa comprime más intensamente los gases acumulados; la fusión empieza antes y el combustible se agota deprisa, así que la vida de la nova es más breve y, además, la explosión expulsa mucha menos materia que si la masa de la enana blanca hubiera sido menor. De la corta vida de V1974 Cygni se sigue que su masa era entre un 20 y un 30 por ciento mayor que la del Sol. La masa de la materia expulsada tuvo que ser de unas 10^{-5} masas solares. Pero la cantidad que muestran las observaciones es al menos 10 veces mayor. No hemos logrado deshacer esta paradoja.





4. LAS REACCIONES NUCLEARES hacen que en un minuto la temperatura (*izquierda*) de la superficie de una enana blanca aumente a casi 400 millones de grados kelvin. A medida que en una explosión de nova se va expulsando gas, la temperatura de éste cae en picado. La emisión en rayos X (*derecha*) observada por el *ROSAT* procede de lo que queda del núcleo de la enana blanca. La emisión desapareció antes de lo previsto; esto indicó que la enana blanca había agotado todo su combustible.



5. EL TELON DE ACERO cae cuando los gases que produce una nova se enfrían y se forman átomos y iones con números atómicos cercanos al del hierro (26). Estos iones absorben toda la luz ultravioleta emitida por la nova. El primer espectro (*violeta*) que tomó el *Explorador Internacional en el Ultravioleta* muestra una fuerte emisión. Al cabo de una hora (*azul*), la radiación ultravioleta había descendido y al día siguiente (*verde*) había desaparecido casi por completo.

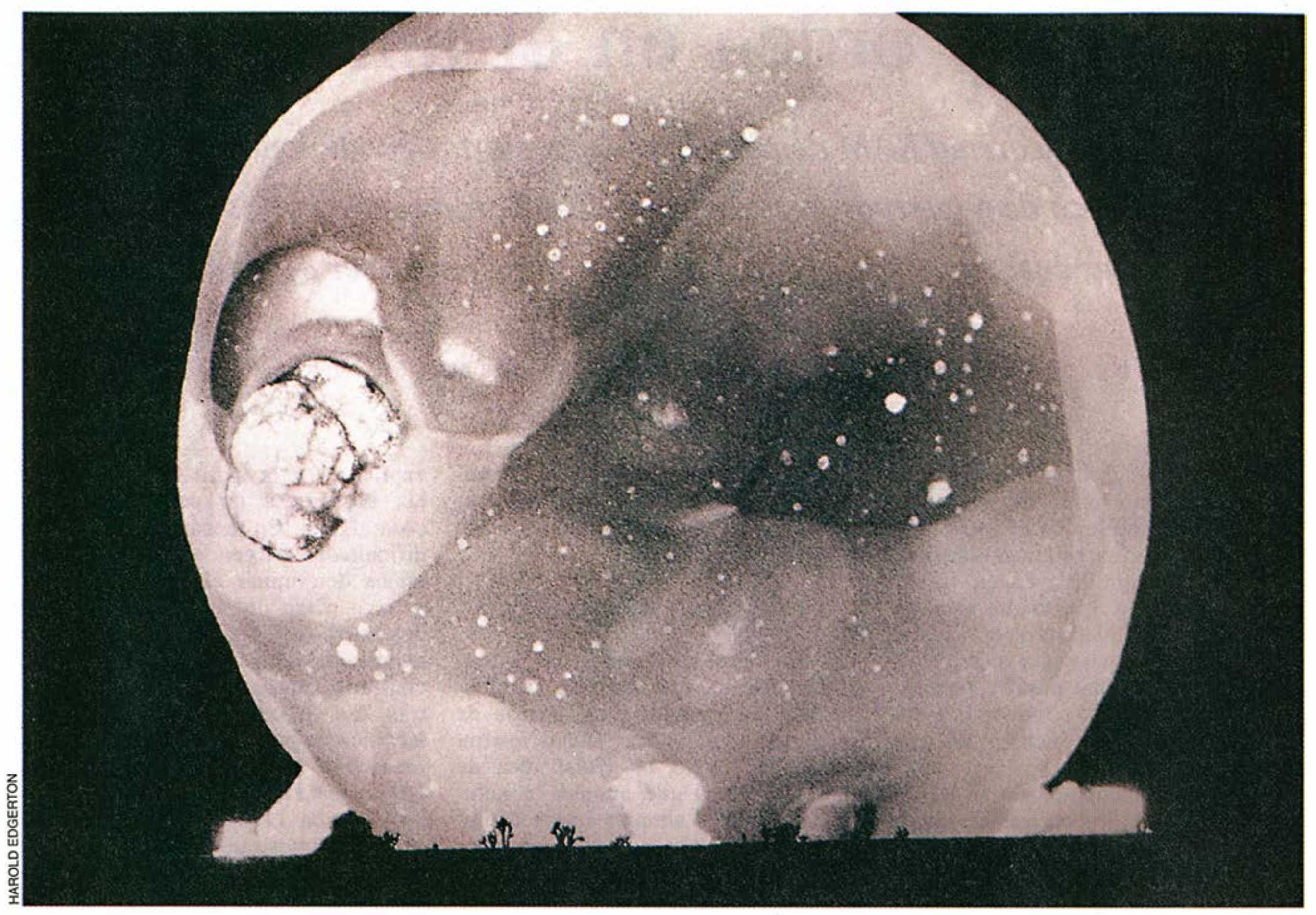
Los nudos podrían ayudarnos a resolver el problema. Nuestra primera observación clara de los nudos se produjo el 7 de septiembre de 1992, cuando observamos la nova con el espectrógrafo Goddard de Alta Resolución (GHRS) del *Telescopio Espacial Hubble*. Con este poderoso instrumento tomamos los mejores espectros ultravioletas de una nova jamás obtenidos. Cada línea de emisión mostraba indicios de que el gas se había expulsado en dos etapas. Había un gas de alta velocidad, expulsado uniformemente, y aglomeraciones de gas, más densas, que procedían con lentitud.

Equipados con los espectros del GHRS volvimos a examinar los datos procedentes del *EIU*. Los espectros tomados justo después de que desapareciera el telón de acero también mostraban los nudos. Estos resultados indican que las estructuras se formaron durante la explosión. Cuando nos servimos de nuevo del GHRS el 1 de abril de 1993, nos encontramos con las mismas aglomeraciones de gas que habíamos identificado antes; se desplazaban a idéntica velocidad. La materia más rápida había desaparecido en buen medida; estábamos mirando a través del gas expulsado.

Robert M. Hjellming resolvió la estructura espacial del caparazón en diciembre de 1992 gracias a la *Gran Red de Radiotelescopios* de Socorro. Las imágenes en radio obtenidas por Hjellming confirmaron nuestro análisis de los nudos. A partir de las imágenes tomadas con el *Telescopio Espacial Hubble* se resolvió el caparazón en el ultravioleta en 1993.

Nunca habíamos obtenido una imagen de los desechos de una nova tan poco tiempo después de la explosión y con tamaña claridad. Los nudos se hallan inmersos profundamente dentro del material expulsado. ¿Qué los causó? ¿De qué están hechos?

Los primeros indicios de la composición del material expulsado aparecieron el 1 de abril de 1992. Una vez se hubo alzado el telón de acero, quedó un intenso espectro con brillantes líneas de emisión de carbono, nitrógeno, oxígeno y otros elementos abundantes. Hasta entonces sólo habíamos encontrado líneas de emisión de este tipo en novas que se produ-



6. LA BOLA DE FUEGO se hincha en una fracción de segundo tras la explosión de una bomba atómica realizada en un campo de prueba de Nevada. Su estructura es muy similar a la de la bola de fuego que se produce en una nova. Esta fotografía, que data de los años cincuenta, se tomó con instrumentos automáticos situados a más de 30 kilómetros.

cían sobre enanas blancas ONeMg de gran masa; conjeturamos que V1974 Cygni pertenecía a esta clase de objetos. Esta idea también se le ocurrió a Thomas L. Hayward y a Robert D. Gehrz, quienes obtuvieron espectros infrarrojos de la nova por medio del telescopio de 5 metros de monte Palomar. Hallaron la línea característica de 12 micrometros que emite el neón ionizado; línea ésta muy débil, si no ausente del todo, en las novas de CO, pero muy intensa en las novas de ONeMg.

En el otoño de 1993 los gases se habían dispersado lo suficiente para que Scott Austin, R. Mark Wagner y los autores pudieran utilizar los espectros ópticos y ultravioletas para determinar la concentración química de los residuos. (Mientras el gas era denso, los átomos chocaban entre sí y los espectros se complicaban mucho.) Encontramos cantidades grandes de elementos del núcleo. De acuerdo con nuestros datos, la materia expulsada tiene 30 veces más oxígeno, neón, nitrógeno y aluminio que la materia solar. Esta composición, similar a la de otras novas ONeMg, sugiere que existen procesos turbulentos, que remueven y mezclan el caparazón y el núcleo, y que quizá creen los nudos y expulsen grandes fragmentos del núcleo.

Otro misterio, relacionado con el anterior, tiene que ver con los elementos sintetizados durante la explosión. Achim Weiss, Irit Idan, Giora Shaviv, Truran y Starrfield calcularon que, en una nova ONeMge, debería producirse ^{22}Na, un isótopo de sodio cuyo número másico es 22. Este isótopo es radiactivo, con un patrón muy singular de emisión de rayos gamma. Nuestros cálculos indican que V1974 Cygni produjo grandes cantidades de ^{22}Na. En el mes de septiembre de 1993, iniciamos la búsqueda de los rayos gamma por medio del *Observatorio Compton de Rayos Gamma*, sin éxito.

Todas estas anomalías nos dicen que, aunque hayamos recorrido un largo camino en el conocimiento de las explosiones de nova, nos queda mucho por aprender. Conocemos las reacciones nucleares que se producen en la explosión, pero no su dinámica. ¿Cuándo se produce la mezcla del caparazón y el núcleo? ¿Mientras se desarrolla la acreción de la materia o durante las últimas fases de la explosión?

Otro misterio es el efecto a largo plazo que en la evolución de la enana blanca tengan las explosiones de nova recurrentes. Todos los sistemas binarios de nova completan el ciclo de acreción y explosión numerosas veces. Si durante cada explosión se pierden partes del núcleo, la masa de la enana blanca deberá disminuir con cada explosión. ¿Acaso termina su masa por hacerse muy pequeña, u ocurre algo que impide que se produzcan nuevas explosiones?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OBSERVATIONS AND PHYSICAL PROCESSES IN BINARY STARS. Steven N. Shore en *Interacting Binaries*. Dirigido por S. N. Shore, M. Livio y E. P. J. van den Heuvel. Springer-Verlag, 1994.

TOPICS IN CLOSE BINARY EVOLUTION. Edward P. J. van den Heuvel en *Interacting Binaries*.

TOPICS IN THE THEORY OF CATACLYSMIC VARIABLES AND X-RAY BINARIES. Mario Livio en *Interacting Binaries*.

Ley y orden en el universo

El teorema KAM demuestra que, en ciertas condiciones, el movimiento de n *cuerpos que se atraen de acuerdo con las leyes de Newton es casi periódico, y que el sistema solar puede ser estable*

Barbara Burke Hubbard y John Hubbard

Hace unos treinta años, un matemático huido de Rumania, hoy profesor en Harvard, estaba tomando clases de conducción, preparándose para la vida en la sociedad capitalista. Cierto día se saltó con toda tranquilidad un semáforo en rojo. Faltó poco para que el profesor le abofetease. "¿Qué pasa?", preguntó el infractor con la mayor inocencia. "¡Me he fijado bien, y no hay policías por aquí!"

A nuestro matemático no se le había ocurrido que las normas de circulación siguen vigentes en ausencia de policía, lección no especialmente difícil, ni siquiera para un matemático. Las normas están para respetarlas.

Una teoría matemática extraordinaria muestra que algo similar les sucede a los objetos inanimados; en determinadas condiciones, los planetas o las partículas elementales se mantienen en órbitas estables, a pesar de que ninguna de las "leyes de conservación" ordinarias, como la de la conservación de la energía o de la cantidad de movimiento, les obliga a hacerlo; en otras circunstancias, en cambio, los planetas y las partículas agotan la totalidad de las posibilidades que dichas leyes consienten.

La teoría KAM (iniciales de Andrei Kolmogorov, Vladimir Arnold y Jürgen Moser) arroja nueva luz sobre el problema de la estabilidad del sistema solar; reviste también interés en el campo de los aceleradores de partículas. Por añadidura, constituye un ejemplo de conexión sorprendente entre dos dominios de las matemáticas muy distantes *a priori*, pues la diferencia entre la estabilidad y la inestabilidad está determinada por una cuestión delicada de la teoría de números, a saber, la aproximación mediante números racionales de los números irracionales.

BARBARA BURKE HUBBARD y JOHN HUBBARD han seguido caminos diversos en su dedicación a la ciencia. Barbara Burke cultiva el periodismo científico y John Hubbard enseña matemática en la Universidad de Cornell.

¿Es estable el sistema solar?

El problema se enraíza en la mecánica celeste, que mereció la atención de los grandes matemáticos de los siglos XVIII y XIX. Isaac Newton (1643-1727) tuvo la genial idea de que las fuerzas que animan la naturaleza son más simples que los movimientos que engendran, y que, para comprender el universo, es preciso describir estas fuerzas —en particular la gravitación— mediante ecuaciones diferenciales. Era posible, en teoría, predecir a partir de ellas los movimientos de todos los cuerpos del sistema solar —del universo entero— por toda la eternidad.

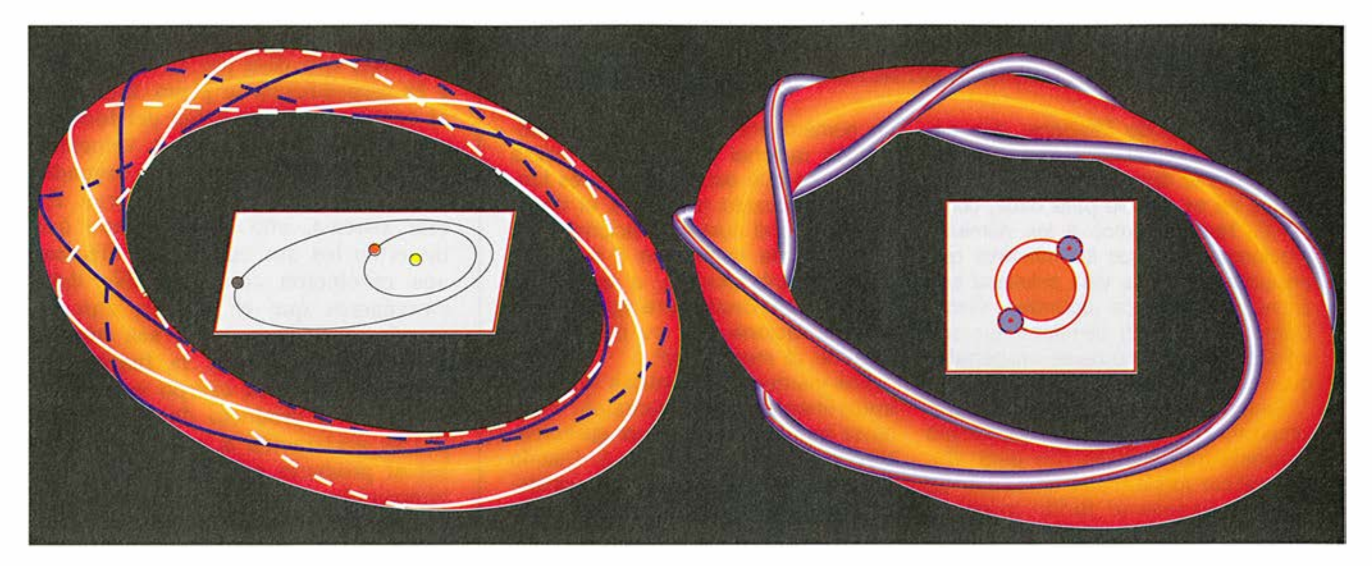
Con optimismo propio de su época, así escribía el matemático y físico Pierre Simon de Laplace (1749-1827): "Una inteligencia que, en un instante dado, conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen, si fuera además lo bastante potente para someter estos datos al análisis, abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los mayores cuerpos del universo y los de los más leves de sus átomos: nada para ella sería desconocido y el futuro, lo mismo que el pasado, se hallaría presente ante sus ojos."

Más tarde fue necesario batirse en retirada y limitarse a una concepción más modesta. "Aunque no existan soluciones explícitas, al menos podemos pensar que, al escribir las ecuaciones que gobiernan un sistema, en cierto sentido puede decirse que éste lo tenemos resuelto", escriben en tono algo quejumbroso R. McKay y J. Meiss en su libro *Hamiltonian Dynamical Systems.*

Desdichadamente, la mayoría de las veces no se dispone de soluciones explícitas, y la mera formulación de las ecuaciones no permite predecir cosa alguna. En mecánica celeste, las dificultades surgen en cuanto intentamos determinar el comportamiento a largo plazo de sistemas de más de dos cuerpos. Un planeta podría verse expulsado del sistema solar o, por el contrario, aproximarse al Sol mientras "no le ocurra un desastre", en lacónica expresión de Jürgen Moser. En el siglo XIX, Laplace, Joseph Louis Lagrange (1736-1813) y Simeon Denis Poisson (1781-1840) se esforzaron en demostrar la estabilidad del sistema solar, pero sus pruebas, aunque daban ciertas seguridades para el porvenir inmediato —dos o trescientos mil años—, nada decían de su destino final. El "problema de los n cuerpos" quedaba planteado.

En el sistema solar, el caso más inquietante corresponde a la pareja Júpiter-Saturno, cuyos "años" se encuentran en la relación 2/5: en el tiempo que Saturno invierte en completar dos revoluciones alrededor del Sol, Júpiter da cinco. Los dos planetas se encuentran periódicamente en la misma posición relativa, y sería de esperar que las perturbaciones debidas a su atracción mutua se acumulasen, ampliando las modificaciones de las órbitas, como la resonancia que se observa al empujar a un niño en un columpio. Más todavía: a diferencia del columpio, los movimientos de los planetas no se modifican por el rozamiento, y nada amortigua sus perturbaciones.

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) predijo que, en virtud de ese cociente racional de 2/5, una pequeña perturbación de la órbita de Saturno o la de Júpiter provocaría la expulsión de Saturno del sistema solar; Karl Weierstrass (1815-1897), egregio matemático, objetó que la estabilidad no podía depender del carácter racional o irracional del cociente de los períodos de las órbitas. ¿Cómo podríamos —preguntábase Weierstrass— medir las ór-



1. LAS DURACIONES de las revoluciones en torno al Sol de los grandes planetas, Júpiter y Saturno, se encuentran en la relación 2/5: ¿podrían sus interacciones reiteradas llegar a deformar tanto sus trayectorias que sus órbitas dejasen de ser estables? En la figura, el sistema Júpiter-Saturno está representado sobre un toro. Las curvas azules y blancas simbolizan dos trayectorias del sistema, que se cierran después de cinco vueltas pequeñas y dos vueltas grandes sobre el toro. El teorema KAM demuestra que, en ciertos casos, existe un dominio de estabilidad que envuelve la trayectoria de un sistema. A la derecha se ha dibujado un toro de KAM que envuelve a una trayectoria: las soluciones de las ecuaciones del movimiento de Júpiter y Saturno son cuasiperiódicas en el interior de este toro (*en azul*), es decir, aunque la trayectoria (*en rojo*) no se cierra sobre sí misma, permanece sobre el toro, como indica la sección de Poincaré dibujada en el centro.

bitas con la precisión suficiente para que adquiera sentido esta diferencia entre racionalidad e irracionalidad?

Weierstrass, exasperado, hizo notar que era igualmente posible que fuera Júpiter el que escapara, lo cual "simplificaría bastante la tarea de los astrónomos, ya que es este planeta el que provoca las mayores perturbaciones". No es menos cierto que estos cocientes racionales resultan esenciales en la descripción matemática, y que haya que tenerlos en cuenta. Tal necesidad era motivo de inquietud para Weierstrass y sus contemporáneos, que no conseguían reconciliar sus ecuaciones con lo que veían en el cielo.

El gran problema de los divisores pequeños

El problema de la resonancia de Saturno y Júpiter se conoce en matemática con el apelativo de "problema de los divisores pequeños". Si dos planetas, cuyos movimientos son independientes (no se tiene en cuenta su interacción), viajan alrededor de un sol, resulta perfectamente compatible con las ecuaciones de Newton la existencia de órbitas estables en la relación 2/5. ¿Persisten estas órbitas cuando se toma en consideración la fuerza gravitatoria entre los dos planetas?

Cabe el que las órbitas no sean perfectamente periódicas, sino cuasiperiódicas. Una órbita cuasiperiódica es igualmente estable: se mantiene siempre entre ciertos límites. Además, tal órbita es repetitiva: si observamos las órbitas correspondientes a un intervalo dado, volveremos a encontrarlas más tarde, salvo por una perturbación arbitrariamente débil.

En el caso de que existan órbitas cuasiperiódicas, pueden describirse mediante series de Fourier convergentes. En 1878, Weierstrass le notificaba a la matemática rusa Sophie Kowalevski, discípula suya, que había conseguido escribir series de Fourier cuyos coeficientes estaban determinados por las ecuaciones del movimiento. ¿Representarían estas series soluciones cuasiperiódicas del problema? Hacía falta demostrar la convergencia de dichas series.

Weierstrass atacó el problema de los divisores pequeños. Una serie de Fourier contiene un número infinito de términos (sinusoides, multiplicada cada una por un coeficiente). La serie ofrece buen comportamiento cuando al sumar todos estos términos (o, por pensar geométricamente, al superponer todas estas sinusoides) la serie es convergente. Se obtiene entonces una función periódica.

En el caso de Saturno y Júpiter, donde el cociente de sus años se aproxima al número racional 2/5, hay un número infinito de coeficientes que contienen divisores muy pequeños. El resultado es que la serie contiene un número infinito de coeficientes muy grandes, que tienden hacia infinito cuando los divisores pequeños tienden a cero. ¿Cómo determinar la convergencia de tal serie?

Weierstrass le comunicaba a Kowalevski su convencimiento de que el problema exigía un enfoque nuevo, aunque él sólo lo veía "de forma nebulosa" (fue preciso esperar a 1942 para disponer de la primera demostración, debida a Carl Siegel, de la convergencia de una serie con divisores pequeños; esta demostración constituye una proeza milagrosa). Poincaré y el matemático estadounidense George Birkhoff, entre otros, pensaban que tales series no convergerían jamás. Pero Weierstrass se inclinaba a creer en su convergencia, según parece, porque antes de su muerte, en 1859, Gustave Lejeune Dirichlet declaró haber descubierto un método para aproximar la solución del problema de los *n* cuerpos.

Dirichlet no dejó ninguna demostración o indicación, pero tanta era su fama de matemático riguroso que Weierstrass se tomó en serio su afirmación; cuando el rey de Suecia estableció en 1885 un premio para un descubrimiento matemático importante, Weierstrass sugirió que se propusiera la convergencia de las soluciones del problema de los *n* cuerpos. El premio le fue concedido a Henri Poincaré, por un texto de más de 200 páginas que parecía indicar que Weierstrass estaba equivocado y que tales series no eran convergentes, o sea, que ninguna órbita iba a ser eternamente estable.

Esta conclusión parecía lógica (a pesar de que Weierstrass no quedó convencido y de que, más tarde, Poincaré admitiera de mala gana que no

Números racionales, irracionales y diofánticos

Se sabe desde Pitágoras que podemos representar ciertos números mediante cociente de dos enteros, lo que no es factible para otros, como el $\sqrt{2}$. Nos referimos a los números irracionales. Aunque los números que encontramos en la vida cotidiana son sobre todo números racionales, Georg Cantor (1845-1918) demostró que son infinitos más los números irracionales que los racionales.

Siempre podemos encontrar aproximaciones racionales para un número irracional (por ejemplo, 7/5 para $\sqrt{2}$). Del mismo modo, cabe aproximar un número irracional tanto como se quiera, con tal de ser pródigo con los denominadores (se utilizan números racionales p/q con denominadores q grandes).

La cuestión siguiente es más sutil: ¿podemos calificar a un número irracional de bien aproximable o de mal aproximable, en el sentido de que a los irracionales bien aproximables podemos acercarnos con parsimonia, utilizando números racionales de denominadores pequeños?

Joseph Liouville (1809-1882) se valió de esta distinción para descubrir la existencia de números trascendentes: números que, a diferencia de los algebraicos, no verifican ninguna ecuación polinómica cuyos coeficientes sean números enteros. El número $\sqrt{2}$ es algebraico, porque es solución de la ecuación $x^2 - 2 = 0$.

¿En qué medida, se interroga Liouville, es pequeña la diferencia entre un número irracional α y su aproximación racional p/q? Liouville utiliza la idea de que esta diferencia es tanto menor cuanto mayor es el denominador q: el número irracional α es diofántico de exponente δ si existe una constante positiva, c, tal que $|\alpha - p/q| > c/q^\delta$. Cualquiera que sea el número racional p/q, su distancia α será de al menos c/q^δ.

Los números diofánticos son mal aproximables por racionales. Pero hasta qué punto sean "mal aproximables" depende del valor de δ. Cuanto mayor es δ, más fácil resulta satisfacer la condición diofántica, y tanto menos significativa es: cuando δ se hace grande, c/q^δ se vuelve pequeño.

Liouville demostró que todo irracional que sea solución de una ecuación polinómica de coeficientes enteros de grado d es diofántico de exponente d. Se sigue de ello que el número:

$$\sum 1/10^{n!} = 0,1 + 0,01 + 0,000001 + 0,000000000000000000000001 + \ldots$$

no es algebraico: es trascendente. Al no ser diofántico para ningún exponente, se muestra extraordinariamente bien aproximable (la aproximación 0,110001 = 110001/1000000 es correcta hasta 23 decimales).

La mayoría de los números trascendentes, como les ocurre a todos los algebraicos, son mal aproximables. Esto explica por qué, en KAM, las soluciones estables son muchísimo más numerosas que las inestables.

la había demostrado "con rigor completo", añadiendo de todas formas que la convergencia de estas series era "sumamente inverosímil"). Poincaré había demostrado que, en el problema de los n cuerpos, no existe una ley de conservación, aparte de las ya conocidas. Si no existe ley de conservación —si, por así decirlo, no hay policía— encargada de impedir que los planetas y las partículas se aventuren jamás a salir de una órbita estable, ¿por qué se comportaban éstos con tanta prudencia?

Las aplicaciones de Poincaré

En la introducción de su artículo, Poincaré llama la atención del lector sobre este "resultado negativo", desarrollado al final de la memoria, añadiendo que "multitud de otras circunstancias nos hacen prever que la solución, si alguna vez podemos descubrirla, exigirá instrumentos analíticos absolutamente distintos de los que poseemos, e infinitamente más complicados. Cuanto más se reflexione sobre las proposiciones que demuestro más adelante, mejor se comprenderá que este problema presenta dificultades inauditas, que hacía presentir ya el fracaso de esfuerzos anteriores, cuya naturaleza e importancia creo haber resaltado todavía más".

El texto de Poincaré no se limita a este resultado: en él se oculta una multitud de ideas y métodos nuevos; es más, se encuentran en él esbozados casi todos los métodos modernos utilizados en sistemas dinámicos. Una de estas ideas (que llevó a Poincaré a descubrir la inexistencia de leyes de conservación) ayuda a entender la evolución de un sistema.

Para comprenderla, tomemos un caso sencillo del problema de tres cuerpos: dos cuerpos de masas iguales se desplazan en un plano a lo largo de sendas elipses que poseen un foco común, mientras que un tercer cuerpo, de masa nula, al que llamaremos cometa, se desplaza sobre una recta que pasa por el foco común y es perpendicular al plano. Lancemos el cometa para que salga del foco en un instante determinado a velocidad dada: a tres kilómetros por segundo, el 3 de mayo, a las 9:05 horas. En este sistema, año es el tiempo que invierten los dos cuerpos en efectuar una revolución completa. (No debe extrañarnos que el cometa, aun teniendo una masa nula, sea atraído por los dos planetas: la fuerza que se ejerce sobre un cuerpo se expresa mediante el producto de la masa m por su aceleración a, y es proporcional al producto mM de las masas en interacción. En esta ecuación podemos simplificar los dos miembros dividiendo por la masa m; sobre la Tierra, todos los cuerpos están sometidos a la misma aceleración.)

La velocidad y la posición del cometa se representan por un solo punto en un plano llamado sección de Poincaré; en este plano, el eje vertical representa la velocidad y el eje horizontal es el tiempo (al final del "año" se regresa al origen y comienza un nuevo año). Se marca en primer lugar el punto de esta sección que describe la condición inicial; después, cada vez que el cometa atraviesa el plano, se marca el punto representativo del instante y la velocidad del paso a través. La aplicación de Poincaré da las reglas para ir de un punto de la sección de Poincaré al siguiente.

Una maraña de curvas: un laberinto temible

La aplicación de Poincaré reduce el número de dimensiones (en el ejemplo, se prescinde de la posición del tercer cuerpo en cada instante), lo que facilita el estudio de un sistema dinámico. Se nos permite así dejar de lado la complejidad inherente a la dimensión 3, pero trae a primer plano las dificultades esenciales del problema; vemos aparecer en esta sección un laberinto de complejidad apabullante, una maraña homoclina.

Esta maraña constituye una red de curvas tan embrolladas, que Poincaré (su descubridor en el contexto de un problema de tres cuerpos ligeramente distinto del de nuestro ejemplo) no se atrevió a dibujarla. "Nada resulta más adecuado para darnos idea de la complicación del problema de tres cuerpos", escribió en *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste.*

La maraña homoclina refleja la naturaleza caótica de una multitud de soluciones posibles. Está compuesta

(en parte) por dos curvas, una estable y otra inestable; cada una de las curvas representa una infinidad de supuestos posibles para el movimiento del tercer cuerpo (el cometa). Seleccionando un punto en la curva estable e iterando la aplicación a partir de este punto —es decir, lanzando el cometa en ese instante y con esa velocidad—, los puntos que se obtienen se encuentran todos sobre la curva estable y tienden hacia un punto particular, hacia el punto periódico inestable.

Eligiendo un punto sobre la curva inestable e iterando la aplicación recíproca (remontándonos, pues, en el tiempo), los puntos obtenidos se encontrarán todos sobre la curva inestable, y tenderán también todos hacia el mismo punto periódico.

Estas dos curvas se cruzan una infinidad de veces. Sus intersecciones, escribe Poincaré, "forman una especie de enrejado, de tejido, una red de mallas infinitamente estrechas; ninguna de las curvas se corta jamás a sí misma, pero sí tiene que replegarse sobre sí misma de una forma muy compleja para volver a cortar una infinidad de veces a todas las mallas de la red...". (Son estas intersecciones las que confieren carácter homoclino al punto periódico.)

La maraña homoclina le hace ver a Poincaré que un sistema de tres cuerpos no posee más leyes de conservación analítica que la conservación de energía, de la cantidad de movimiento y de los momentos angulares. Una nueva ley hubiera constreñido a todas las soluciones (el conjunto de evoluciones del sistema, correspondientes a todas las posiciones iniciales posibles) a situarse, en una sección de Poincaré, sobre curvas ordenadas y lisas completamente diferentes del conjunto tumultuoso formado por la maraña homoclina; Poincaré había demostrado, por tanto, que no existe ninguna otra ley de conservación suplementaria. La conclusión de que ninguna solución del problema se encuentra sobre curvas lisas —vale decir, que no se dan órbitas estables— le pareció razonable a la comunidad de matemáticos. Mas no por ello dejaba de ser falsa.

KAM: el orden sin ley

La primera indicación de su inexactitud fue una disertacion del matemático ruso Andrei Kolmogorov (1903-1987) quien esbozó las líneas generales de una demostración: no solamente pueden existir órbitas estables en ausencia de leyes de conservación, sino que, en ciertas condiciones, la mayoría de las órbitas son estables. La anterior fue sólo una de las numerosas proezas matemáticas de Kolmogorov, que fue también el primero en darse cuenta de que la teoría de la probabilidad y la teoría de la medida coinciden, y que contribuyó notablemente a la teoría de la información y a la turbulencia.

Este teorema, conocido en nuestros días por teorema KAM, lo demostrarían en 1962 Vladimir Arnold (entonces en la Universidad de Moscú) y Jürgen Moser (de la Escuela Superior Politécnica de Zurich). Se aplica no solamente al problema de los n cuerpos, sino a todo sistema no disipativo (sin rozamiento) de la mecánica clásica.

KAM se ocupa de las perturbaciones de un sistema integrable (un sistema es integrable si posee suficientes leyes de conservación; así ocurre con el problema de los n cuerpos

Series de Fourier y soluciones periódicas

A comienzos del siglo XIX, Joseph Fourier demostró que una función periódica casi completamente arbitraria —una función que se repite indefinidamente con cierto período— es representable mediante la suma de un número infinito de sinusoides (senos y cosenos), afectados de un coeficiente. Esta suma constituye una serie de Fourier. Por ejemplo, la función "onda cuadrada" admite un desarrollo en serie de Fourier:

$$f(x) = \text{sen}\, x + 1/3\, \text{sen}\, 3x + 1/5\, \text{sen}\, 5x + \ldots \quad (1)$$

En la figura (*a*) vemos la función f y la suma de los términos primero, tercero y quinto de la serie.

Son los coeficientes los que diferencian a una serie de Fourier de otra y los que permiten la reconstrucción de la función a partir de la serie. En el caso de la función "cuadrada", los coeficientes son 1, 1/3, 1/5, ...

Para que tal serie de sinusoides represente una función es necesario que sea convergente: los coeficientes tiendan a cero con suficiente rapidez. Por ejemplo, la serie

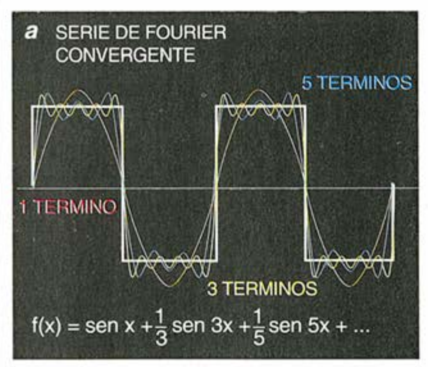
$$\text{sen}\, x + 3\, \text{sen}\, 3x + 5\, \text{sen}\, 5x + \ldots \quad (2)$$

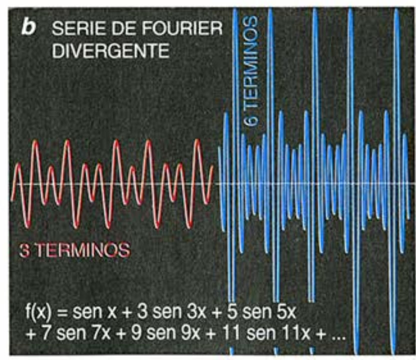
es divergente, y no representa una función. La figura (*b*) presenta la suma de los tres primeros y de los seis primeros términos de tal serie.

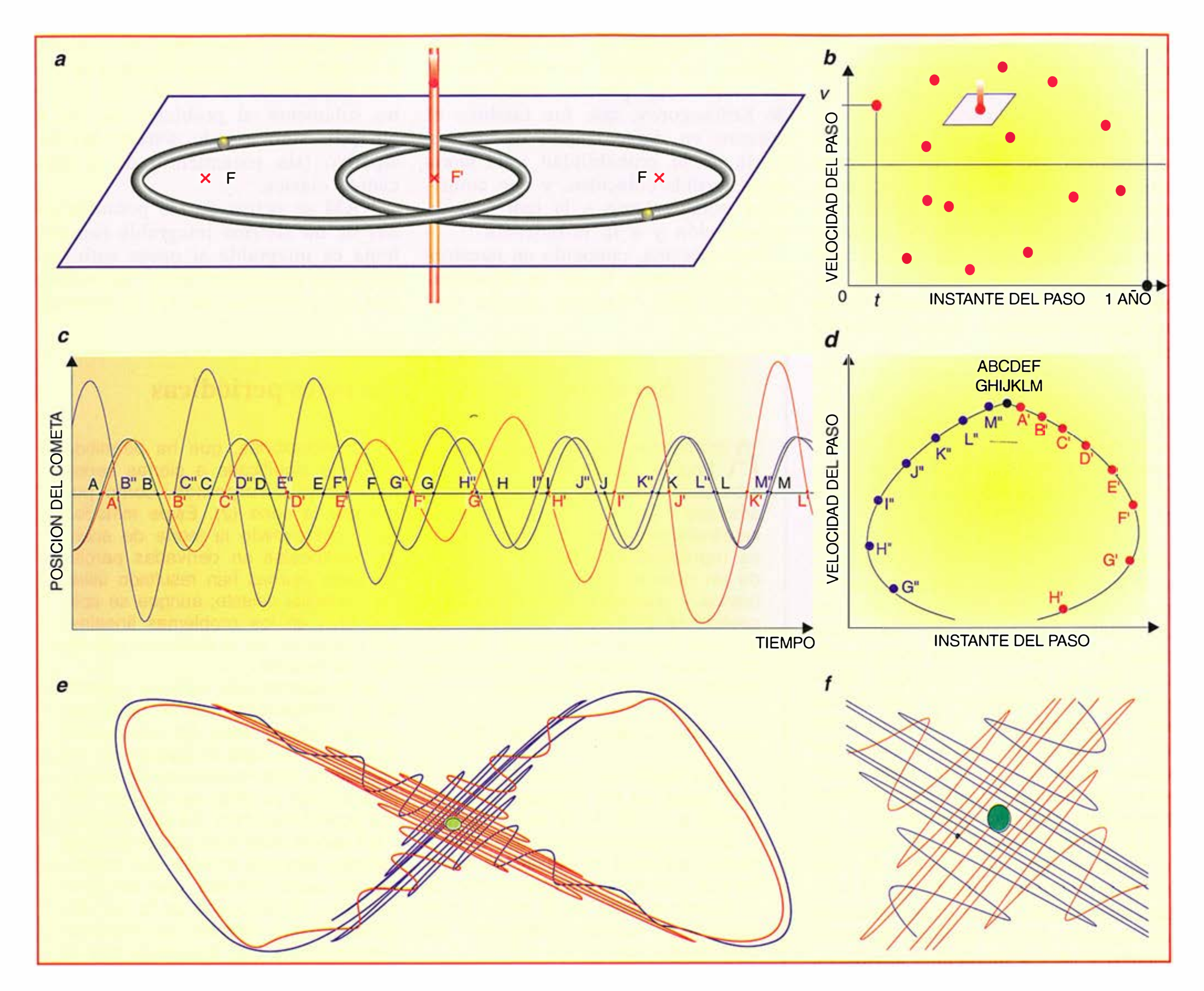
Laurent Schwartz e Israel Gelfand descubrieron un nuevo método, el de las distribuciones, que ha permitido dotar de significado a ciertas series de Fourier divergentes, como por ejemplo la serie (2). Estos métodos han transformado la teoría de ecuaciones lineales en derivadas parciales, pero apenas han resultado útiles en mecánica celeste; aunque se aplican bien en los problemas lineales, los problemas de la mecánica celeste son no lineales.

Si buscamos una solución periódica (o cuasiperiódica) de un problema, parece natural tratar de representar la solución en serie de Fourier. En los problemas más importantes de mecánica celeste se obtienen de esta forma ecuaciones para los coeficientes. Para que la serie con los coeficientes hallados sea una solución del problema, se exige, además, que sea convergente. El problema de la convergencia es muy delicado: en mecánica celeste ocurre con frecuencia que la expresión que proporciona el n-ésimo coeficiente contiene en el denominador un término difícil de controlar, que es pequeño para una infinidad de valores de n; este fenómeno pone en peligro la convergencia de la serie.

Los principales matemáticos de los siglo XIX y XX tropezaron con este problema. Como ha dicho Poincaré, estas dificultades "pertenecen a la naturaleza de las cosas y no pueden eliminarse. Es extremadamente probable que volvamos a encontrárnoslas, cualquiera que sea el método que se utilice."







2. DOS PLANETAS circulan, en este supuesto, a lo largo de elipses que poseen un foco común. Un cometa, de masa nula, cursa a lo largo de una recta perpendicular al plano de la elipse que pasa por el foco común (*a*). En (*b*), una sección de Poincaré representa la velocidad *v* del cometa en función del instante *t* en que éste atraviesa el plano de las elipses. Los tiempos de paso están representados módulo un año, siendo un año la duración de la revolución de un planeta a lo largo de la elipse. En los sistemas de este tipo existe al menos un punto fijo; tal punto corresponde a una trayectoria estable del cometa, la trayectoria negra de la figura (*c*), en la que los puntos de paso del cometa se repiten todos los años a fecha fija. En la sección de Poincaré, esta trayectoria se representa por un solo punto (*d*). Existen trayectorias del sistema que se aproximan infinitamente a esta trayectoria, como la azul y la roja. La maraña de estas curvas en la sección de Poincaré (*e*) en los alrededores del punto periódico traduce la complejidad del problema de los tres cuerpos, e incluso del problema restringido de tres cuerpos de nuestro ejemplo. En la figura (*f*) vemos ampliada la maraña que rodea al punto periódico.

cuando n–1 cuerpos poseen una masa nula, o en el caso del billar con mesa redonda, que veremos más abajo). En general, una perturbación de tal sistema destruye ciertas leyes de conservación. KAM afirma que, para perturbaciones suficientemente pequeñas, la mayoría de las órbitas son estables: ya no son periódicas, sino cuasiperiódicas, que nunca se alejan demasiado de las órbitas periódicas del sistema no perturbado. Al igual que los buenos ciudadanos que esperan pacientemente a que el semáforo se ponga verde antes de cruzar la calle, incluso de noche, cuando las calles están desiertas, estas órbitas se atienen a "reglas" incluso cuando éstas no existen. Otras órbitas son caóticas e imprevisibles, y otras más (y son éstas las que explican, probablemente, la estabilidad de Saturno y de Júpiter) se hallan aprisionadas para siempre en "islas de estabilidad" en un océano de caos.

Arnold y Moser han demostrado resultados bastante diferentes. "La idea básica —escribe Moser— consiste en inventar una técnica de iteración cuya convergencia sea tan rápida que se pueda controlar el efecto acumulativo de los divisores pequeños." ¡En el enunciado de J. Moser, no se admiten más que perturbaciones 333 veces derivables! No es raro que los matemáticos utilicen funciones dos veces derivables, pero el requisito de que una función sea 333 veces derivable da una idea de las dificultades de la demostración. Más recientemente, aunque no sin dificultad, se ha probado que bastan tres derivadas.

La demostración de Arnold es, en cierto sentido, más restringida: se ocupa tan sólo de las perturbaciones analíticas (más lisas todavía que las infinitamente derivables). Pero su demostración es válida para un número arbitrario de dimensiones, mientras que la de Moser concierne sólo a la dimensión dos. Dado que las ecua-

RACIONALIDAD, IRRACIONALIDAD Y PEQUEÑOS DIVISORES

¿Qué relación existe entre los pequeños divisores y los números racionales e irracionales? Para comprender esta relación, tan esencial para el teorema KAM, fijémonos en la cuestión siguiente: si $f(t)$ es una función periódica, ¿existe una función $g(t)$ del mismo período definida por:

$$g(t) - g(t-p) = f(t)? \qquad (1)$$

Este problema es una versión linealizada del problema de las órbitas de Júpiter y Saturno. Como siempre resulta más fácil pensar en cantidades concretadas en dinero, imaginémonos una hipotética cuenta corriente. Nuestra función $g(t)$ representa el saldo de la cuenta corriente al cabo de un tiempo t, al cual se suma o sustrae dinero de forma continua; $g(t-p)$ representa el saldo de esta cuenta 24 horas antes (expresado en años, p vale alrededor de 1/365). La función $f(t)$ es dada, y mide, en cada instante, cuánto hemos gastado o ganado en las 24 horas precedentes.

Decir que $f(t)$ es periódica, con período de un año, por ejemplo, significa que nuestros gastos se repiten de igual forma todos los años: si el año pasado gastamos 20.000 pesetas durante un determinado período de 24 horas, también vamos a gastar 20.000 pesetas durante el mismo período de este año, y otro tanto ocurrirá dentro de diez o de cien años.

Si $f(t)$ es periódica, de período un año, ¿será posible tener una cuenta corriente en la que el saldo $g(t)$ se repita, también, con período de un año? Tal cuenta puede variar de un instante a otro, y día y día, pero toda su historia se repite infatigablemente cada año. Como a Poincaré y Weierstrass, a quienes les inquietaba saber si el sistema solar es estable a largo plazo, a nosotros nos interesa saber si nuestra cuenta corriente es estable a largo plazo: ¿podemos estar seguros de que jamás haremos bancarrota (caer en el Sol) o de que nunca seremos millonarios (evasión del sistema solar)?

Son muchísimas las cuentas corrientes $g(t)$ posibles (pero no todas periódicas; esto es lo que hace falta determinar). No hemos dicho nada sobre las condiciones iniciales. Si queremos saber cuánto dinero queda en nuestra cuenta, no basta conocer el saldo inicial. Si solamente supiéramos eso, podríamos calcular a partir de la función $f(t)$ cuánto tenemos 24 o 48 horas más tarde, pero no sabremos cuánto hay en la cuenta en los instantes intermedios.

Para resolver este problema necesitamos conocer el saldo de la cuenta de una forma continua. Ello es posible si conocemos el saldo en todo instante de las primeras 24 horas; entonces, mediante una serie de restas, podemos determinar $g(t)$ con la fórmula (1).

Durante el primer día tenemos libertad, pues, para darnos tanto dinero como queramos; mejor dicho, estamos obligados a considerar la familia de las infinitas posibilidades. Nuestra pregunta adopta ahora esta otra forma: entre todas las cuentas corrientes $g(t)$ posibles, ¿las hay que se repitan con período de un año? ¿Existen soluciones periódicas?

Nuestro método será el mismo que utilizaron Weierstrass y sus contemporáneos para estudiar las órbitas de los planetas. ¿Será posible expresar $g(t)$ mediante una serie de Fourier convergente? Vamos a expresar de nuevo nuestra ecuación mediante series de Fourier. Veremos entonces que la racionalidad o la irracionalidad de los números gobierna nuestras matemáticas de forma decisiva.

Una serie de Fourier es una suma infinita de senos y cosenos, o mejor, de exponenciales complejas, que resultan aquí más manejables. Escribamos:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{2\pi int}, \quad g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{2\pi int}$$

donde los a_n [los coeficientes de Fourier de $f(t)$] son conocidos, y los b_n [los coeficientes de Fourier de $g(t)$] son las incógnitas. La ecuación $g(t) - g(t-p) = f(t)$ de partida se convierte en:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{2\pi int} - \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{2\pi int(t-p)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{2\pi int},$$

o sea,

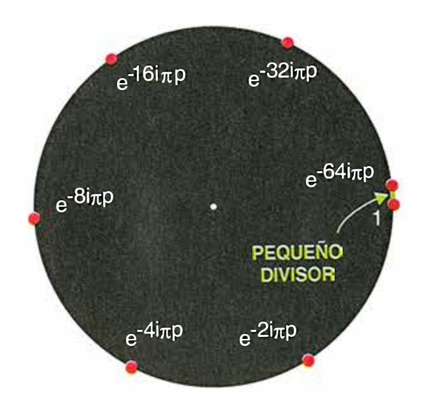
$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n (1 - e^{2\pi inp}) e^{2\pi int} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{2\pi int},$$

Cuando dos series de Fourier son iguales, lo son término a término; resulta de ahí la ecuación milagrosa

$$b_n = a_n / (1 - e^{-2\pi inp}) \qquad (2)$$

Aparentemente, hemos resuelto nuestro problema: hemos hallado los coeficientes de Fourier de la función incógnita $g(t)$; sólo falta sumar la serie. Pero no nos apresuremos a cantar victoria: cada coeficiente b_n contiene en su denominador el molesto término $1 - e^{-2\pi inp}$ y este número es muy pequeño para ciertos valores de n, pudiendo ser nulo incluso cuando p es racional.

Para entender esa situación, dibujemos un círculo de radio 1 en el plano complejo; el punto (1, 0) es, pues, el punto 1. El punto $e^{-2\pi ip}$ es el punto de coordenadas (cos $2\pi p$; − sen $2\pi p$). Si p es un número racional a/b, np es un entero cuando n es un múltiplo del denominador b. Entonces $e^{-2\pi inp} = 1$ y nuestra fórmula (2) contiene un cero en el denominador. En tal caso, el problema carece de solución.



¿Qué sucede si el número p es irracional? En tal caso, la expresión (2) define a los números b_n; aun así hemos de andar cautos. El número np no es nunca un número entero de vueltas, pero se le acerca arbitrariamente y el denominador $1 - e^{-2\pi inp}$ se hace muy pequeño. Por ejemplo, el año astronómico no consta de 365 días, sino de 365,24... Encontraremos por ello coeficientes grandes en los alrededores de todos los múltiplos de 365, y coeficientes mucho mayores cada $(365 \times 4) + 1 = 1461$ (es decir, que los 1461 días forman, por muy poco, cuatro años).

Estos divisores pequeños $1 - e^{-2\pi inp}$ dividirán a a_n, los cuales, por su parte, son pequeños cuando n es grande, puesto que la serie que expresa a $f(t)$ es convergente. ¿Será cierto que estos a_n tienden a cero con la suficiente rapidez para permitir la convergencia de la serie, o serán, por contra, los pequeños divisores los que la decidan?

La solución hallada por KAM es que la serie no será convergente si el número irracional p está muy próximo a un número racional, vale decir, si es bien aproximable por números racionales. Si es mal aproximable, KAM demuestra que la serie es convergente. La mayoría de los números irracionales son mal aproximables y, por tanto, (para sistemas sometidos a perturbaciones pequeñas) las soluciones estables son mayoritarias.

ciones del movimiento son analíticas y que el universo no es bidimensional, el teorema de Arnold se aplica mejor a la mecánica celeste.

Contrariamente a las experiencias numéricas realizadas con ordenadores, el teorema KAM es fiable y riguroso; a largo plazo, los inevitables errores de los redondeos crecen de forma exponencial. Pero el programa *Billiards*, realizado por uno de los autores y su alumno Ben Hinckle, ilustra el comportamiento complejo que el teorema KAM elucida. El billar constituye un sistema dinámico más simple que el problema de los tres cuerpos, pero que presenta dificultades esenciales; su estudio con carácter de sistema dinámico se remonta a Birkhoff, en 1927.

La usuaria del programa *Billiards* crea una mesa de billar de forma arbitraria mecanografiando una fórmula; después observa una sección de Poincaré, en la cual, para cada rebote de la bola, se marca el punto (x, y), donde x representa la posición de la bola (el punto del borde de la mesa en el que rebote) mientras que y es el ángulo de incidencia (ángulo formado por la trayectoria y la tangente al borde de la mesa en ese punto). La usuaria puede observar, simultánea o sucesivamente, la trayectoria de la bola y su itinerario en la sección de Poincaré (la sucesión de puntos prescritos por la aplicación de Poincaré).

Cuando se juega a *Billiards* en una mesa circular, la bola rebota siempre con ángulo igual al de incidencia; este ángulo se conserva. Si el ángulo es racional, la bola siempre hará impacto en unos mismos puntos de la circunferencia; por ejemplo, con un ángulo de 60 grados, o sea, 1/6 de círculo, describirá un triángulo equilátero, y en la sección de Poincaré se marcarán tres puntos.

Si el ángulo es irracional, la bola, en el curso de su trayecto infinito, rebota arbitrariamente cerca de todos y cada uno de los puntos del borde, y en la sección de Poincaré vemos dibujarse una línea recta horizontal (el ángulo de incidencia es constante: se trata de una ley de conservación).

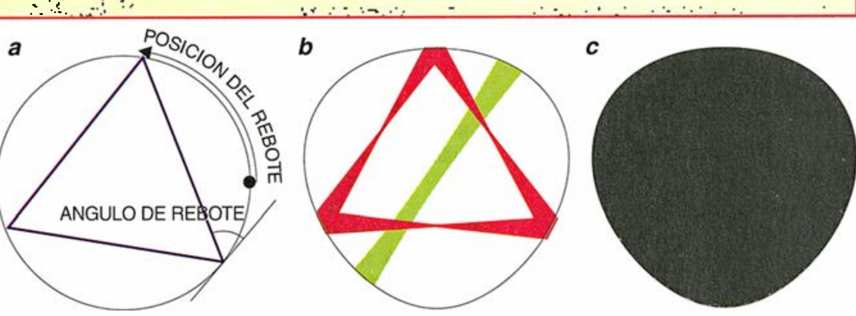
El juego resulta más divertido al deformar el círculo para destruir la ley de conservación del ángulo (la situación análoga, en el problema de los n cuerpos, consiste en dotar de masa no nula a los planetas, para que éstos interactúen). Cuando la mesa está muy deformada, todas las trayectorias de las bolas, y consiguientemente, todos sus itinerarios en la sección de Poincaré, se vuelven caóticos. Se producen fenómenos exóticos cuando la perturbación es pequeña (no forzosamente tan pequeña como la exigida por KAM; en las simulaciones en ordenador, las órbitas estables parecen perdurar, incluso al perturbarlas mucho más de lo indicado por los límites teóricos).

Si, con un círculo deformado, la usuaria del programa elige de punto de partida ciertos puntos de la sección de Poincaré, obtendrá en esta sección itinerarios aparentemente caóticos, sin estructura discernible, mientras que un punto muy próximo engendrará un archipiélago de "islas" disjuntas que recorren la sección. Ahora bien, regiones extensas de la sección de Poincaré —que representan muchas condiciones iniciales— producen líneas titubeantes que cruzan la sección como un borracho que se esfuerza en parecer sobrio: son las soluciones estables y cuasiperiódicas que tanto habían buscado Poincaré y Weierstrass.

Las aproximaciones racionales

Ninguna de las imágenes de las secciones de Poincaré ha recibido cabal descripción matemática: no podemos predecir todos los itinerarios resultantes de una perturbación dada del billar. Los itinerarios caóticos parecen llenar uniformemente regiones enteras de la sección (o quizá toda la sección; incluso eso resulta difícil de determinar), pero no sabemos si lo hacen de manera efectiva o si poseen estructura de algún tipo. Tampoco tenemos garantías de que, cuando un punto engendra un itinerario estable, también vaya a hacer lo mismo otro punto situado a su lado, a pesar de que ello sea estadísticamente probable. Sin embargo, KAM explica "a grandes rasgos" por qué tenemos itinerarios estables e inestables.

La distinción reclama la interven-



3. EN UN BILLAR CIRCULAR, una trayectoria con tres rebotes (*a*) es indefinidamente estable. La trayectoria pasa y torna a pasar indefinidamente sobre sí misma. En la sección de Poincaré (*arriba*), esta trayectoria corresponde a las visitas sucesivas de los tres puntos azules. Al deformar ligeramente la mesa de billar (*b*), las trayectorias se conservan casi periódicas. Las trayectorias rojas corresponden a tres rebotes y están representadas por los islotes de estabilidad en la sección de Poincaré, al igual que las trayectorias verdes con dos rebotes. Ciertas trayectorias llenan por completo toda la mesa de billar (*c*); estas trayectorias caóticas dan una nube de puntos en la sección de Poincaré.

Las leyes de conservación

Un sistema dinámico, como el de *n* cuerpos en interacción gravitatoria, evoluciona a lo largo del tiempo de acuerdo con las leyes de Newton. El estado de un sistema en cierto instante está representado por la información que determina su evolución a partir de dicho instante, que consiste en las posiciones y las velocidades de los *n* cuerpos (*a*). La evolución del sistema queda descrita geométricamente por una curva en el conjunto de estados (*b*).

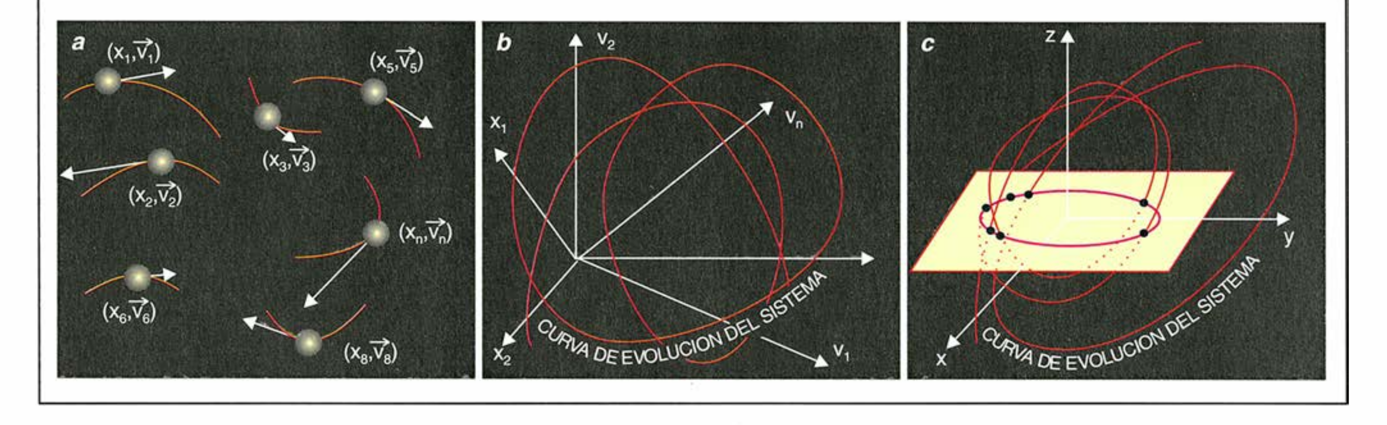
Una ley de conservación es una función de estado (una función cuyo valor depende del estado) que se mantiene constante a lo largo del tiempo. Las leyes de conservación clásicas del problema de *n* cuerpos son: (*1*) la conservación de la energía, (*2*) las tres leyes de conservación de la cantidad de movimiento (una para cada uno de los ejes *x, y, z*) y (*3*) las tres leyes de conservación del momento angular. Cada una de estas cantidades conservadas puede calcularse en un instante dado conociendo el estado en tal instante. Cada cantidad está fijada por las condiciones iniciales, y una vez lanzado el sistema, permanece constante.

Poincaré buscaba leyes de conservación analíticas adicionales, que impusieran restricciones a las formas de las soluciones posibles. Una ley de ese tipo obligaría a las soluciones (vistas como itinerarios en la sección de Poincaré) a encontrarse sobre curvas lisas, específicamente, curvas analíticas descritas por series enteras.

Una ley de conservación analítica es una ley que asocia el mismo valor a cada estado de un sistema dinámico que evoluciona. Por ejemplo, si la ley de conservación está dada por la función $x^2 + y^2$ (esto es, si la cantidad $x^2 + y^2$ se mantiene constante), entonces en todos los estados sucesivos del sistema todos los puntos (*x, y*) determinan el mismo valor para esta función: han de encontrarse sobre una circunferencia con centro en el origen. El valor en cuestión (el cuadrado del radio) puede variar para las distintas evoluciones, pero cada punto de la sección de Poincaré está constreñido a permanecer en una circunferencia (*c*).

En el caso de un billar circular, la bola, al rebotar, lo hace siempre con ángulo igual al de incidencia; este ángulo se conserva. Dicha ley se añade a las leyes de conservación clásicas y hace que la sección de Poincaré sea una recta. Las leyes de conservación no aparecen siempre con semejante nitidez; pueden ser oscuras y muy difíciles de discernir. En el caso de una mesa de billar elíptica existe una ley de conservación, pero se requiere cierta sagacidad para descubrirla: todas las trayectorias son tangentes, o bien a una elipse confocal, o bien a una hipérbola confocal (la cantidad que se conserva es la excentricidad de la elipse o de la hipérbola).

Para demostrar que en el problema de los *n* cuerpos no existe ninguna ley de conservación suplementaria, basta con hallar un supuesto (un itinerario en la sección de Poincaré) que no pueda encontrarse sobre una curva analítica. Poincaré descubrió una infinidad en la maraña homoclina. Sin embargo, todavía en 1960 había astrónomos convencidos de la existencia, en ciertas condiciones, de una tal ley de conservación, que utilizaban para explicar ejemplos de estabilidad que se explican de muy diferente modo por KAM.



ción de los números irracionales que son diofánticos y, por tanto, mal aproximables por números racionales cuyos denominadores sean pequeños. En el ejemplo del billar, las trayectorias estables que sobreviven a las deformaciones de la mesa son aquellas cuyo número de rotación es diofántico. Eso, al menos, afirma el teorema KAM, porque en el ordenador sólo aparecen los números racionales y, por consiguiente, los más diofánticos de todos los números.

En el caso de una mesa circular (no deformada), el número de rotación de una órbita es el doble del ángulo de incidencia; cada número de rotación corresponde a un orden particular de los puntos del círculo por los que pasa la bola. Si afirmamos que, al perturbar el sistema, sobreviven los itinerarios cuyo número de rotación es mal aproximable, damos a entender que encontramos itinerarios deformados, aunque estables, en los cuales el orden de los puntos impactados sobre el borde de la mesa es el mismo que para el sistema sin perturbar. Cuanto más difícil resulte de aproximar el número de rotación, más estable será el itinerario. En el caso de pequeñas deformaciones, es mucho más probable que vayamos a dar con un itinerario estable que con un itinerario inestable, porque la mayoría de los números son diofánticos; al aumentar la deformación cada vez desaparecen más itinerarios estables.

Este resultado posee consecuencias importantes para los aceleradores de partículas. No es raro que los protones viajen 10^{11} veces en torno a un anillo de almacenamiento; número de revoluciones que corresponde a 100.000 millones de años terrestres. KAM garantiza a los físicos la estabilidad de un haz de protones y orienta sobre la construcción de los aceleradores.

Números racionales y órbitas estables

Además, KAM arroja nueva luz sobre el enigma del par Saturno-Júpiter, al poner de manifiesto que los números de rotación racionales pueden crear itinerarios extraños en la sección de Poincaré. Como hemos

visto ya, si se juega al billar en una mesa circular, un número de rotación igual a 1/3 hace que la bola impacte siempre en los tres mismos puntos, y siempre con idéntico ángulo: ello corresponde exactamente a tres puntos en la sección de Poincaré.

Al deformar el círculo, una de las posibilidades es que la bola "intente" hacer impacto en estos tres puntos, pero apunte mal: aunque yerra en el blanco, no se aparta demasiado. En la sección de Poincaré, el itinerario salta de una "isla" a otra. Se puede decir, por extraño que parezca, que la deformación de la mesa vuelve más estables a los números de rotación racionales: se toleran los errores pequeños y ya no hay necesidad de apuntar exactamente.

Aunque el teorema KAM enuncia la existencia de soluciones "isla" para los números racionales, éstas no constituyen las únicas soluciones posibles. Contrariamente a los itinerarios asociados a números de rotación mal aproximables, en los que se puede esperar que un cambio pequeño en las condiciones iniciales produzca sólo una pequeña perturbación del itinerario, los itinerarios restringidos a las islas pueden perfectamente existir junto a itinerarios caóticos, como los concebidos por Poincaré en la maraña homoclina. Tales itinerarios caóticos podrían explicar los "hiatos de Kirkwood" del cinturón de asteroides que viajan alrededor del Sol, entre Marte y Júpiter —es decir, la ausencia de asteroides en aquellas órbitas que estuvieran en resonancia con Júpiter.

Saturno y Júpiter

El caso de la pareja Saturno-Júpiter es más complicado que nuestro ejemplo del billar. Un estado del sistema compuesto por Júpiter, Saturno y el Sol está representado —suponiendo, para simplificar, que los tres cuerpos yacen sobre el mismo plano— por un punto de un espacio de ocho dimensiones. Mientras no se perturbe el sistema (los dos planetas son de masa nula), habrá en ese espacio un toro de dimensión siete que representa los estados en los que cinco años de Júpiter equivalen a dos años de Saturno.

Como no podemos dibujar en ocho dimensiones, hemos trazado un dibujo de un toro bidimensional en el espacio ordinario, dotado de algunas trayectorias que se cierran sobre sí mismas después de haber girado dos veces en un sentido y cinco veces en el otro. Estas trayectorias, periódicas, representan los estados sucesivos del sistema en los que la relación de las órbitas es de 2/5.

Si dotamos ahora a los planetas de una pequeña masa positiva, sobrevivirán algunas de estas trayectorias periódicas. (Se podría objetar que la masa de Júpiter, 318 veces mayor que la de la Tierra, no es precisamente pequeña, pero sí lo es en comparación con la solar: el centro de gravedad del sistema Sol-Júpiter está en el interior del Sol.) Aparecen otras trayectorias cuasiperiódicas en forma de pequeños toros que envuelven a las trayectorias periódicas. Estos pequeños toros son análogos a las "islas" que hemos visto más arriba en el caso del billar, asociadas al número de rotación 1/3 (otras trayectorias periódicas supervivientes son generatrices de caos y de marañas homoclinas).

Podemos imaginar que la órbita del par Saturno-Júpiter reside sobre uno de estos pequeños toros (la probabilidad de tal suceso no es nula). Lo cual conduciría a órbitas cuasiperiódicas, en las cuales los planetas permanecerían por siempre estables, con años cuya razón oscilaría ligera y eternamente en torno al cociente 2/5, sin que la duración del año estuviera definida, eludiendo así la cuestión, tan inaceptable para Weierstrass, de la racionalidad.

Un cometa de Halley a la medida

Existen en la sección de Poincaré zonas enteras donde reina la incertidumbre. Nadie sabe pronosticar qué puntos de tales zonas producirán "islas", qué puntos engendrarán caos (ni siquiera se sabe si todos los itinerarios que parecen caóticos lo son en verdad). Sin embargo, tenemos una ilustración impresionante del comportamiento caótico en el problema restringido de tres cuerpos, explicado más arriba, en el que dos cuerpos de la misma masa se desplazan por el plano en trayectorias elípticas, mientras que el tercer cuerpo, el cometa de masa nula, atraviesa el plano perpendicularmente (estos resultados son debidos a V. Alekseev y K. Sitnikov).

En este sistema, resulta posible, hasta cierto punto, confeccionar un "cometa de Halley" a la medida, programándolo de forma que vuelva cuando queramos. Eligiendo una secuencia arbitraria de números enteros (mayores que un número que depende de la excentricidad de la órbitas de los cuerpos masivos), por ejemplo, 21, 215, 37, 469, 79, 724.... podemos hacer arrancar el cometa (lanzarlo en un instante particular, con una velocidad determinada) y conseguir que vuelva a atravesar el plano en los años especificados y sólo en esos precisos años (siendo un año el tiempo invertido por los dos cuerpos con masa en efectuar una revolución completa).

En nuestro ejemplo, el cometa retornará 21 años más tarde; una segunda vez, 215 años después, y así sucesivamente. Pero si cometemos el más mínimo error, lo perderemos: en lugar de retornar al cabo de 21 años, el cometa tardará en regresar 50 o quizá 500 años; estas órbitas son inestables en el más alto grado.

Y también son sumamente controlables. Como hace notar T. Körner en su libro *Fourier Analysis*, los ingenieros del siglo XIX asociaban control y estabilidad; los primeros aviones se construyeron pensando en que fueran estables. Ahora bien, cuando se pilota un avión muy estable, resulta difícil reaccionar ante las ráfagas de viento o maniobrar en combate. Después de la Primera Guerra Mundial, escribe T. Körner, "hasta los aviones civiles comenzaron a fabricarse para que fueran estables en medida justa, e incluso ligeramente inestables, a causa del grado de control que ello le proporciona al piloto".

El teorema KAM proporciona respuestas desconcertantes a las cuestiones de mecánica celeste que preocupaban a los matemáticos; no obstante, siguen persistiendo enigmas. Cuando jugamos al billar encontramos trayectorias que no comprendemos; quisiéramos poder predecirlas todas.

La importancia del teorema trasciende el ámbito del sistema solar: ha cambiado de raíz la manera en que los físicos y los matemáticos conciben los sistemas de la mecánica clásica. KAM demuestra que estos sistemas son profundamente diferentes de lo que se imaginaba. Si nos representamos uno de tales sistemas como una lucha entre el orden y el desorden, resulta que el orden es más poderoso de lo que se pensaba; el orden no depende sólo de leyes; en ciertas condiciones, estos sistemas dan pruebas de estabilidad innata.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUR LE PROBLÈME DES TROIS CORPS ET LES ÉQUATIONS DE LA DYNAMIQUE en OEUVRES DE HENRI POINCARÉ (Tomo VII). Henri Poincaré. Gauthier-Villars, 1951.

LES MÉTHODES NOUVELLES DE LA MÉCANIQUE CÉLESTE. Henri Poincaré. Dover Publications, primera edición, 1957.

PROBLÈMES ERGODIQUES DE LA MÉCANIQUE CLASSIQUE. V. I. Arnold y A. Avez. Editions Gauthier-Villars, 1967.

STABLE AND RANDOM MOTIONS IN DYNAMICAL SYSTEMS. Jürgen Moser, en *Annals of Mathematics Studies*, n.º 77. Princeton University Press, 1973.

Ancianos entre los ancianos

Los nonagenarios y centenarios gozan de una salud y vigor desconocidos entre las personas veinte años más jóvenes. Quizá debamos replantearnos los criterios aceptados sobre el envejecimiento

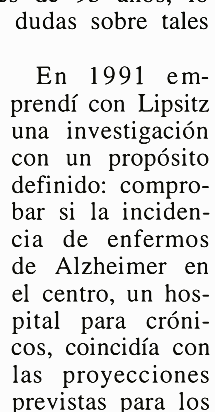
Thomas T. Perls

En la facultad de medicina me enseñaron que la incidencia de trastornos crónicos discapacitantes, en particular la enfermedad de Alzheimer, aumenta inexorablemente con la edad. Y así, al iniciar mi especialización geriátrica, esperaba que mis pacientes mayores de 95 años, ancianos entre los ancianos, fueran los más débiles; pero la experiencia me lo desmintió: a menudo se trataba de los más sanos y ágiles. Sirva de ejemplo cierto centenario con quien tenía concertada una entrevista. Me rogó que la retrasáramos. Había visto jurar el cargo a 19 presidentes de la Unión y dedicaría la mañana de la cita a votar a su candidato siguiente.

Hechos como éste ponían en cuestión la vieja y simple relación directa entre envejecimiento y cadencia progresiva de achaques. ¿Cabía la posibilidad de que muchos nonagenarios avanzados disfrutaran de buena salud y que el grupo de los más ancianos constituyera una población especial, mal conocida? Desde entonces, y con excepciones contadas, los centenarios que he tratado confiesan que su novena década de vida transcurrió exenta de problemas. Muchos trabajaban, llevaban una vida sexual normal y disfrutaban del aire libre y del ocio. La edad, insistían, no era un problema. Opinión que respaldan las pruebas que se van acumulando, a tenor de las cuales una parte significativa de este grupo de edad goza de mejor salud que muchos octogenarios o que estén todavía en los noventa y pocos. La idea arraigada de que el paso de los años lleva sin remisión al deterioro extremo debe revisarse.

Quizá haya que modificarse también el cálculo del coste que significará atender a este grupo de edad en el futuro. La población centenaria aumentó un 160 por ciento en EE.UU. durante el decenio de 1980. Muchos demógrafos predicen que habrá entre 20 y 40 millones de personas con 85 años o más en 2040; diez años más tarde, habrá, según esas curvas de proyección, cuatro millones de centenarios. La carga económica que significaría cuidar a las personas mayores de 85 años podría resultar costosísima si un porcentaje elevado de las mismas requiriera, además, atenciones especiales. Pero, ¿y si los gastos sanitarios del grupo de ancianos más ancianos fueran menores de lo supuesto?

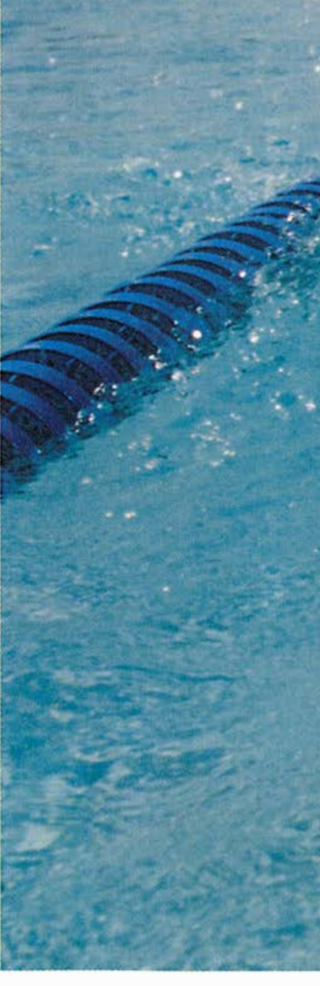
Mis primeras sospechas de semejante posibilidad nacieron a raíz de un estudio sobre la enfermedad de Alzheimer que llevé a cabo con Lewis A. Lipsitz. Según los registros publicados, esta afección que arruina la capacidad mental conduce a la muerte al 40 % de las personas de 85 años o mayores. Algunos informes reseñan que casi el 50 % de los nonagenarios y el 70 % de los centenarios padecen Alzheimer. Pero muchos de los estudios en los que se basan estas afirmaciones no incluyen a personas mayores de 93 años, lo que arroja algunas dudas sobre tales extrapolaciones.



En 1991 emprendí con Lipsitz una investigación con un propósito definido: comprobar si la incidencia de enfermos de Alzheimer en el centro, un hospital para crónicos, coincidía con las proyecciones previstas para los



THOMAS T. PERLS conoció a la primera centenaria en su propia familia: su bisabuela, Julia Grunewald, con quien aparece a la izquierda, vivió hasta los 102 años. Perls enseña en la facultad de medicina de la Universidad de Harvard, labor que comparte con la de geriatra en el hospital Deaconess de Boston.



centenarios. De los 12 residentes que habían cumplido un siglo, sólo cuatro padecían Alzheimer. Esta baja cifra —el 25 %— resaltaba tanto más cuanto se trataba de personas internadas, que, a diferencia de las no hospitalizadas, presentan ya algún tipo de deterioro.

Nuestros hallazgos sugerían que, al menos en lo que a capacidad mental se refiere, los más ancianos se hallaban en mejor forma de lo que se ha venido suponiendo. ¿A qué debían su buen estado? Sospechamos que la respuesta reside en que, por la razón que sea, algunas personas oponen particular resistencia a las enfermedades que discapacitan y matan a la mayoría antes de los 90 años. En virtud de esa resistencia, no sólo sobreviven, sino que se desenvuelven relativamente libres de achaques. Se trata, en otras palabras, de una curiosa versión de supervivencia del mejor adaptado. Estos individuos parecen seleccionados para sobrevivir largo tiempo porque poseen rasgos que les capacitan para evitar o retrasar las enfermedades que suelen acompañar al envejecimiento.

La noción, de origen darwinista, de supervivencia selectiva la aplicaron, con algunas restricciones más, los demógrafos del decenio de 1970 a los ancianos americanos de color. Hasta los 75 años la mortalidad de los americanos de raza negra era



1. CENTENARIO Y DEPORTISTA. Tom Lane compitió en 100 metros espalda en las Olimpiadas Senior celebradas el pasado mes de septiembre en San Diego. El ejemplo de Lane contradice la idea de que la edad trae consigo una debilidad generalizada.

La más anciana

Supervivencia del mejor adaptado

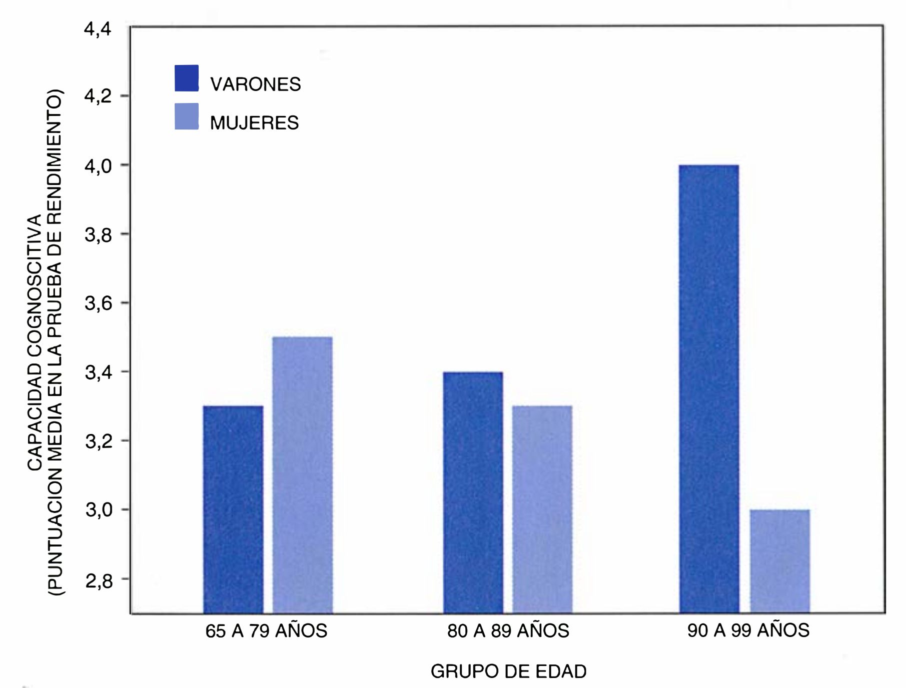
Jeanne Calment, francesa con más de 120 años a sus espaldas, es la persona más anciana cuya edad se haya podido confirmar. En la fotografía celebra su 116 aniversario. Calment y otras como ella enseñaron a los investigadores que los índices de mortalidad de los ancianos entre los ancianos son inferiores, con mucho, a lo que cabría esperar de la extrapolación de los índices de defunción de los individuos más jóvenes (*gráfico de la izquierda*). James W. Vaupel, Anatoli Yashin, A. Roger Thatcher y Vaino Kannisto examinaron las estadísticas de defunción de un total de ocho millones de personas. Encontraron que, a partir de los 97, la posibilidad de que una persona fallezca a una edad dada se desvía de la tendencia esperada (*verde claro*). En vez de aumentar siguiendo una curva exponencial, el índice disminuye tendiendo a una representación más lineal (*verde oscuro*). (La proporción superaría la unidad si muriera todo un grupo de edad en menos de una año.) Estos hallazgos respaldan la hipótesis del autor según la cual los miembros más viejos de nuestra especie tienden a estar más sanos de lo que deberíamos inferir a tenor de la visión clásica del envejecimiento.

Tendencias de mortalidad similares se observaron entre ciertas moscas (*gráfico de la derecha*), lo que proporciona un ulterior apoyo a la hipótesis del autor. James R. Carey comparó las mortalidades esperadas (*naranja claro*) con las observadas (*naranja oscuro*). Encontró que la posibilidad de morir a una edad determinada alcanzaba un máximo en torno a los 50 días. Traspasado ese umbral, el riesgo empezaba a disminuir, de modo que a los 100 días, los insectos más viejos tenían sólo una posibilidad de un 5 % de morir un día determinado.

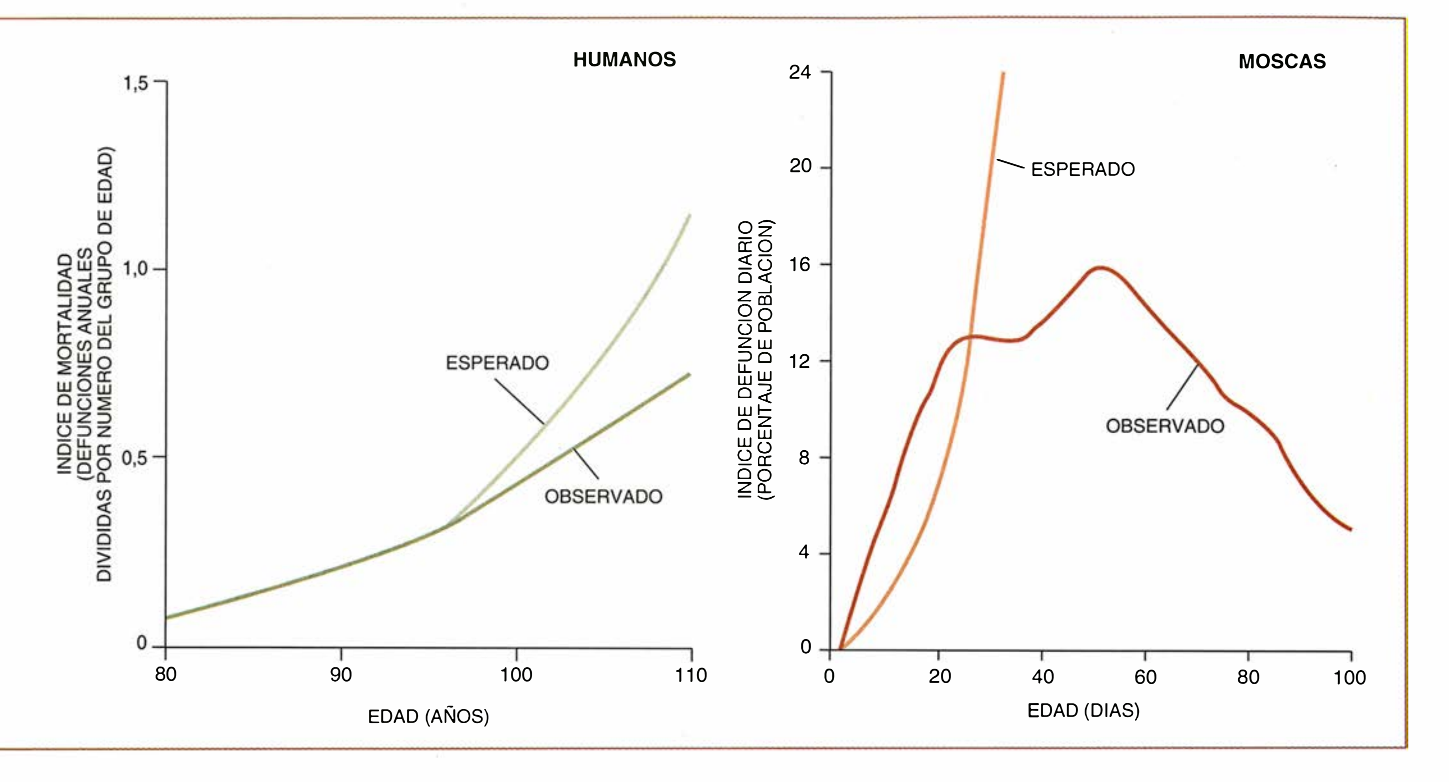
mayor que la correspondiente a los blancos; traspasado ese umbral, la tendencia se invertía; en lo que se denominó un fenómeno de cruzamiento, la probabilidad de que los blancos murieran a una edad determinada era mayor que la de sus compatriotas negros. Atribuyeron a la inferioridad económica y al menor acceso a la sanidad la tendencia de los negros a morir antes. Quienes sobrevivían constituían un grupo insólitamente robusto, capaz de superar los obstáculos que derrotaban a los demás. El vigor, a su vez, les confería después una ventaja de supervivencia sobre la mayoría de los americanos blancos de edad similar.

Esta hipótesis de supervivencia selectiva permite aclarar otros fenómenos, hasta ahora inexplicables, que ponen de manifiesto la sorprendente salud física y mental de los más ancianos. Según parece, la probabilidad de que los varones que sobreviven hasta la segunda mitad de los noventa desarrollen la enfermedad de Alzheimer va disminuyendo a medida que pasan los años. Además, el estado mental del varón medio de esa edad es mejor que la del varón medio octogenario. Quizás esas pautas sean consecuencia de que los hombres susceptibles de padecer enfermedad de Alzheimer suelen fallecer de la afección cuando tienen ochenta y tantos o al poco de entrar en los noventa. Estas tendencias se explicarían si el grupo de varones que alcanza el siglo lo formaran casi exclusivamente individuos insensibles a la enfermedad de Alzheimer y que, por tanto, conservaran sus facultades mentales.

La salud mental de los varones mayores de 90 años, considerados en su conjunto, es en general mejor que la de sus coetáneas femeninas. Las mujeres, según parece, tienden a convivir con su demencia, más que a morir de ella. Por consiguiente, las ancianas añosas conservan por término medio menos vigor mental que los varones de su misma edad, es decir,



2. LAS CAPACIDADES COGNOSCITIVAS de los varones más ancianos (*barra azul oscura a la derecha*) son por término medio más elevadas que las de las mujeres de su misma edad (*barra azul clara a la derecha*), aun cuando entre las personas de 65 a 79 años las mujeres parecen tener una ligera ventaja (*izquierda*). El fenómeno contrario, conocido como cruzamiento de género, ocurre entre los 80 y los 89 años (*en el medio*). Este modelo surge porque los hombres con deterioro mental suelen morir antes que las mujeres; los varones que resisten muestran un estado mental fundamentalmente sano.



los supervivientes sanos que han quedado después de la muerte de otros varones sensibles a la demencia.

En estas avanzadas edades, los varones gozan también de mejor salud que las mujeres. Sexagenarios y septuagenarios se muestran más proclives que las mujeres a padecer accidentes cerebrovasculares y paros cardíacos. El retraso en el comienzo de estas afecciones agudas permite a las mujeres vivir más que los varones, quienes tienen que afrontar la enfermedad en etapas tempranas de su vida. En cifras absolutas, hay bastantes más mujeres de 95 años; en términos de salud mental y física media, los hombres toman entonces la delantera. Los varones sanos que han esquivado las enfermedades demuestran una ventaja de supervivencia: aunque los hombres constituyen sólo el 20 % de los centenarios, el 40 % de los que llegan a 105 años son varones. Este giro hacia una mayor adaptación física y mental en los hombres después de los 90 años constituye lo que yo llamo cruzamiento del género.

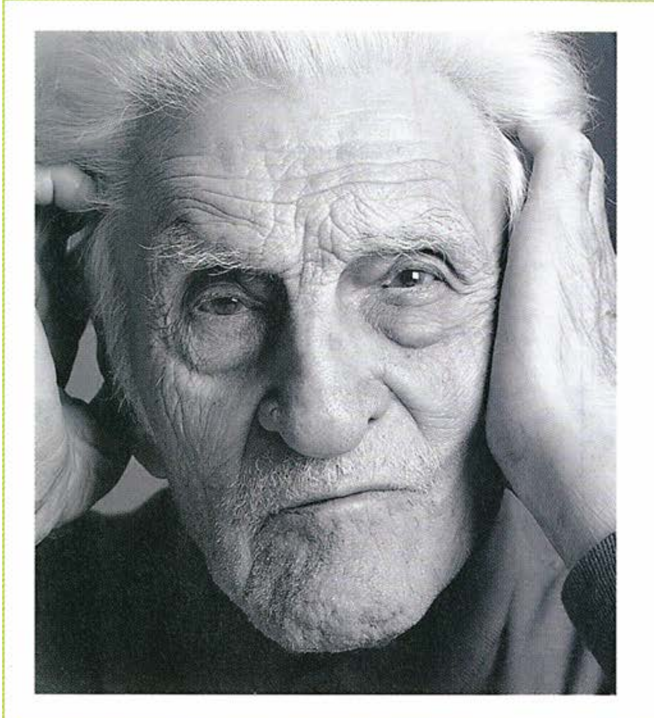
Podemos observar los primeros signos de ese fenómeno en los estudios realizados entre las personas octogenarias. Los varones que rebasan dicha edad sin grandes problemas de salud, continúan viviendo quizá sin necesitar atención especial. El equipo encabezado por Richard M. Suzman encontró que los varones mayores de 80 años eran más independientes que las mujeres de edad similar. En el artículo de 1984 señalaban que el 44 % de los varones pertenecientes a ese grupo de edad eran fuertes e independientes en comparación con tan sólo el 28 % de las mujeres del mismo grupo de edad. Kenneth G. Manton y Eric Stallard calcularon la esperanza de vida activa de los miembros de la población anciana de EE.UU. Según sus resultados, a partir de los 85 años cabe esperar que los hombres tengan una vida activa y sana más larga que las mujeres.

¿Qué factores biológicos y ambientales permitirían a los humanos más ancianos llegar a los 95 años y sobrepasarlos en buena salud? Condiciones múltiples y entrelazadas desempeñan, sin duda, importantes papeles. Los genes de la longevidad parecen proteger contra el desarrollo de enfermedades; habilidades adaptativas, determinadas o no genéticamente, capacitan a los supervivientes para evitar las afecciones que signifiquen una amenaza potencial para la vida. Ciertos hábitos de la vida cotidiana —abstención del tabaco, dieta equilibrada y ejercicio— ayudan a mantenerse en forma más tiempo. El no haber sufrido reveses especiales seguramente contribuye también.

Seductores candidatos a posibles genes de longevidad en humanos son los que controlan el mecanismo de autoprotección del organismo contra los radicales de oxígeno. Estos compuestos de gran reactividad que aparecen de forma natural lesionan el ADN y destruyen las células. Todos nacemos con determinada capacidad para combatir este tipo de lesiones. Las variaciones génicas que cifran una resistencia eficaz contra la agresión oxidativa podrían contribuir a la prolongada vida de los más ancianos, al disminuir la tasa de daño que los radicales de oxígeno infligen a las células.

Además de ser portadores de los genes de la longevidad, los más ancianos quizá tengan un complemento bajo de genes deletéreos. Mis colegas y yo mismo hemos encontrado pruebas de ello. Hace poco se ha vinculado una forma del gen que cifra la apolipoproteína E (*apo-E*) a un riesgo sustancialmente mayor de adquirir la enfermedad de Alzheimer. La edad media de comienzo del Alzheimer parece estar relacionada con el tipo de genes *Apo-E* que una persona hereda de cada progenitor. Hay tres formas comunes: *E2*, *E3* y *E4*. Las personas que heredan dos genes *E4* (uno de cada uno de los progenitores) multiplican por ocho el riesgo común de contraer la enfermedad; cuando la adquieren, exhiben síntomas a una edad media de 68 años. Los pacientes con Alzheimer que portan dos genes *E3* manifiestan síntomas de la enfermedad algo después, en torno a los 75 años. El papel de la *E2* sigue sin aclararse, pero hay pruebas que la asocian a un menor riesgo de desarrollar la enfermedad.

En colaboración con Bradley T. Hyman, hemos determinado la incidencia de *E4* entre sujetos sanos de 90 a 103 años. Según nuestros resultados,



Tres que lo consiguieron

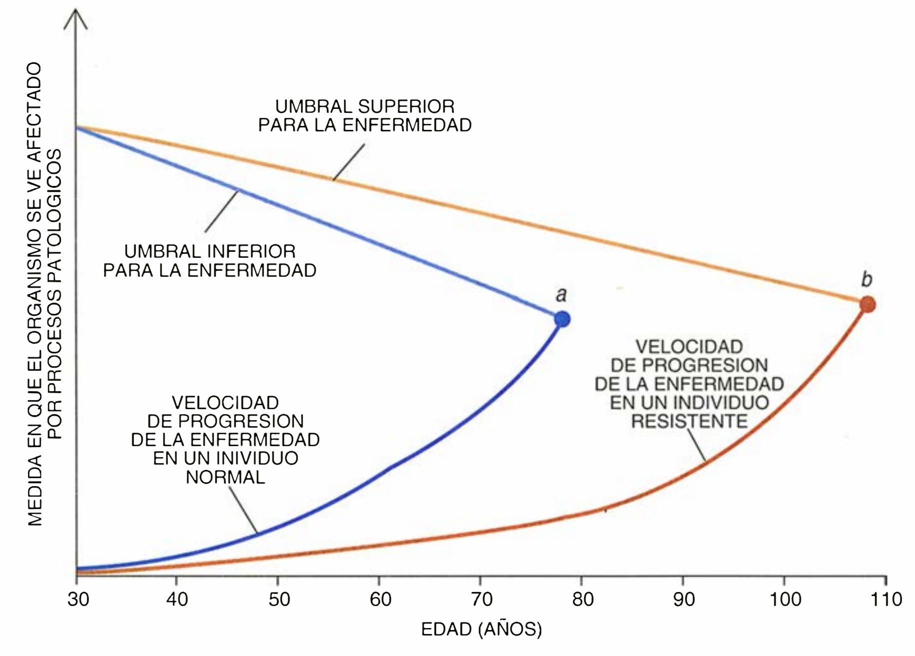
Las personas mostradas aquí son algunos de los mayores más ancianos y más sanos que han superado los azares y han sobrevivido hasta cumplir un siglo o casi. La investigación sugiere que heredar buenos genes proporciona probablemente la mejor esperanza para una vida larga y sana. Otros factores podrían revestir interés también. Estos individuos suelen tener sus propias hipótesis para explicar tamaña longevidad; a la investigación científica corresponde aclararlas.

ALFRED BENEDETTI, de 101 años, ha participado en lanzamiento libre de jabalina, tiro y baloncesto en las Olimpíadas Senior durante los últimos 11 años. Hasta el verano de 1994, jugaba a los bolos dos veces por semana. Benedetti atribuye su salud y longevidad a que ni fuma ni bebe (salvo un vasito de oporto que toma todos los días). Está constantemente ocupado y pasa mucho de su tiempo leyendo, escribiendo o haciendo trabajos manuales.

el 14 % del grupo (con una edad media de 93 años) tenía al menos un gen *E4*. Estudios anteriores realizados entre personas de 85 años indicaron que el 18 % es portador al menos de un gen *E4* y que el 25 % de las personas más jóvenes de 65 era portador del tipo génico. La incidencia de la variedad *E4* disminuye notablemente al aumentar la edad, cayendo casi al 50 % en un intervalo de 28 años. (De acuerdo con otros estudios, hay una reducción aún mayor entre los centenarios.) Sospechamos que los más ancianos tienen frecuencias insólitamente bajas de genes *E4*, en parte porque este tipo génico se halla asociado con una mayor probabilidad de desarrollar enfermedad de Alzheimer de desenlace fatal; por consiguiente, muchos de los que tienen el *E4* no alcanzan a ver los noventa. Aunque el *E4* puede ser uno de los muchos marcadores potenciales de un mayor riesgo de mortalidad, no se ha demostrado su valor como factor de predicción de la enfermedad de Alzheimer.

Los genes podrían constituir una suerte de plantilla de la esperanza de vida del sujeto. Pueden considerarse indicadores de la capacidad con la que una persona afronta la enfermedad. Como tales, contribuyen a determinar dos propiedades interrelacionadas que influyen en el envejecimiento: la capacidad adaptativa y la reserva funcional. Se llama adaptativa la capacidad de una persona para superar una enfermedad o lesión o para afrontar con eficacia esas tensiones. Por reserva funcional se entiende cuánto se demanda de un órgano para que obtenga un rendimiento adecuado. Obviamente, la capacidad adaptativa depende en parte de la reserva funcional del organismo, porque la habilidad para afrontar la enfermedad precisa el funcionamiento adecuado de los órganos.

La importancia de estas dos características para la supervivencia de los



3. EL ELEVADO UMBRAL para la adquisición de enfermedades crónicas y un proceso de envejecimiento más lento podrían explicar por qué los más ancianos suelen sobrevivir con buena salud, según el modelo teórico del autor. En la mayoría de nosotros, la lesión tisular derivada de procesos patológicos se produce con relativa rapidez (*azul oscuro*) y nuestro umbral para la enfermedad disminuye muy deprisa a medida que envejecemos (*azul claro*); así, en torno a la edad de 80 años aparecen los síntomas de las enfermedades relacionadas con el envejecimiento (*a*). Los individuos resistentes que envejecen despacio (*naranja oscuro*) y tienen un umbral más elevado para la enfermedad (*naranja claro*) se vuelven sintomáticos mucho más tarde (*b*), si llegan a serlo.

ANGELINA STRANDEL, de 101 años, aconseja a quienes aspiren a llegar a su edad que "vigilen las calorías y se alejen de los alimentos grasos". Strandel indica también que, aunque durante su vida ha tenido que enfrentarse a muchos problemas, no deja que el estrés la domine. Ahora vive con su hijo; la longevidad parece cosa de familia: su hermana vivió 100 años.





HERBERT KIRK, de 99 años, se licenció en arte en 1993 en la Universidad estatal de Montana. Aparece aquí con la escultura que presentó como proyecto de fin de carrera. Kirk atribuye su longevidad a la práctica de ejercicio: jugaba al tenis hasta los ochenta años y todavía le gusta correr. Cuando tenía 95, ganó dos medallas de oro (en 800 metros y cinco kilómetros) y una de plata (en 200 metros) en un campeonato internacional senior celebrado en Helsinki.

más ancianos se aprecia en los efectos variables que ejerce la acumulación progresiva de nudos neurofibrilares sobre la cognición. Se llama nudos neurofibrilares a la red de células cerebrales muertas que van apareciendo con el envejecimiento; abundan en los enfermos de Alzheimer. El número de nudos que puede acumularse antes de que se perciban los signos de Alzheimer varía de un paciente a otro. A este propósito, una autopsia reveló que un hombre de 103 años que exhibía pocos signos externos de enfermedad de Alzheimer tenía tal cantidad de nudos neurofibrilares, que, de haberse encontrado en un cerebro más joven, habríamos hablado de un paciente con merma creciente de sus facultades mentales. Cabe suponer que el anciano tenía un exceso de reserva de función cerebral que le permitía compensar el proceso que estaba lesionando su cerebro. Quizá las personas en quienes la acumulación de nudos es lenta y que muestran una elevada tolerancia a ellos pueden mantenerse mentalmente sanas durante mucho tiempo, mostrando signos manifiestos de Alzheimer sólo en una etapa muy tardía, si llegan a expresarse.

El descubrimiento de que muchas personas con más de 95 años están en buena forma quizás induzca a revisar la planificación futura de la atención sanitaria de los más ancianos. Buena parte de dicha planificación se basa en la tesis según la cual, aunque las condiciones letales podrían retrasarse con el avance de las técnicas médicas, la incidencia de enfermedades degenerativas no sufrirá alteraciones. La tesis postula que los ancianos entre los ancianos seguirán padeciendo un número mayor de enfermedades y experimentarán más discapacidad crónica que las personas octogenarias. Si este planteamiento fuera cierto, el continuo aumento del tamaño de la población de los más ancianos presagiaría una carga significativa de salud deficiente entre los miembros más añosos de la sociedad.

Pero los datos que empiezan a aflorar encajan mejor en la tesis contraria. James F. Fries ha propuesto que las mejores formas de vida y los avances médicos concentrarán la morbilidad, la mortalidad y la discapacidad en un período más corto. Significa ello que se pospondría el comienzo de las grandes enfermedades mortales (cardiopatía, cáncer, accidentes cerebrovasculares y enfermedad de Alzheimer), así como el de las enfermedades discapacitantes asociadas con la edad (enfermedad articular degenerativa, deterioro sensorial y pérdida benigna de la memoria). En coherencia con la hipótesis de Fries, los vigorosos centenarios atraviesan un breve período de achaques antes de morir. Aunque las estadísticas de causa de defunción entre los centenarios son escasas, la información disponible sugiere que las causas habituales son enfermedades agudas, como la neumonía, y no afecciones letales de larga duración. En cierto modo, pues, el anciano más anciano parece un reflejo de la imagen del futuro dada por Fries; quizá sea el representante de los raros individuos que resisten ellos solos la enfermedad, sin la ayuda de la ciencia médica avanzada.

Cuando redacté estas líneas Madame Jeanne Calment, de Arles, había cumplido 120 años. La mayoría de nosotros no nos aproximamos siquiera a esa edad y si hay alguno con aspiraciones de Matusalén sepa que cuenta con muchas probabilidades en su contra. Pero la investigación reciente sobre el grupo de los más ancianos ha inspirado un nuevo planteamiento sobre la biología del envejecimiento. Los estudios genéticos, bioquímicos y epidemiológicos deberían revelar con precisión por qué algunas personas oponen resistencia a las afecciones debilitantes (y tal vez ofrezcan formas para incrementar esa capacidad en una franja más ancha de la población).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SLOWING OF MORTALITY RATES AT OLDER AGES IN LARGE MEDFLY COHORTS. James R. Carey, Pablo Liedo, Dina Orozco y James W. Vaupel en *Sciencie*, vol. 258, págs. 457-461; 16 de octubre de 1992.

ESTIMATES OF CHANGE IN CHRONIC DISABILITY AND INSTITUTIONAL INCIDENCE AND PREVALENCE RATES IN THE U.S. ELDERLY POPULATION FROM THE 1982, 1984 AND 1989 NATIONAL LONG TERM CARE SURVEY. Kenneth G. Manton, Lawrence S. Corder y Eric Stallard en *Journal of Gerontoly: Social Sciences*, vol. 48, n.º 4, págs. S153-S166; julio de 1993.

Ciencia y empresa

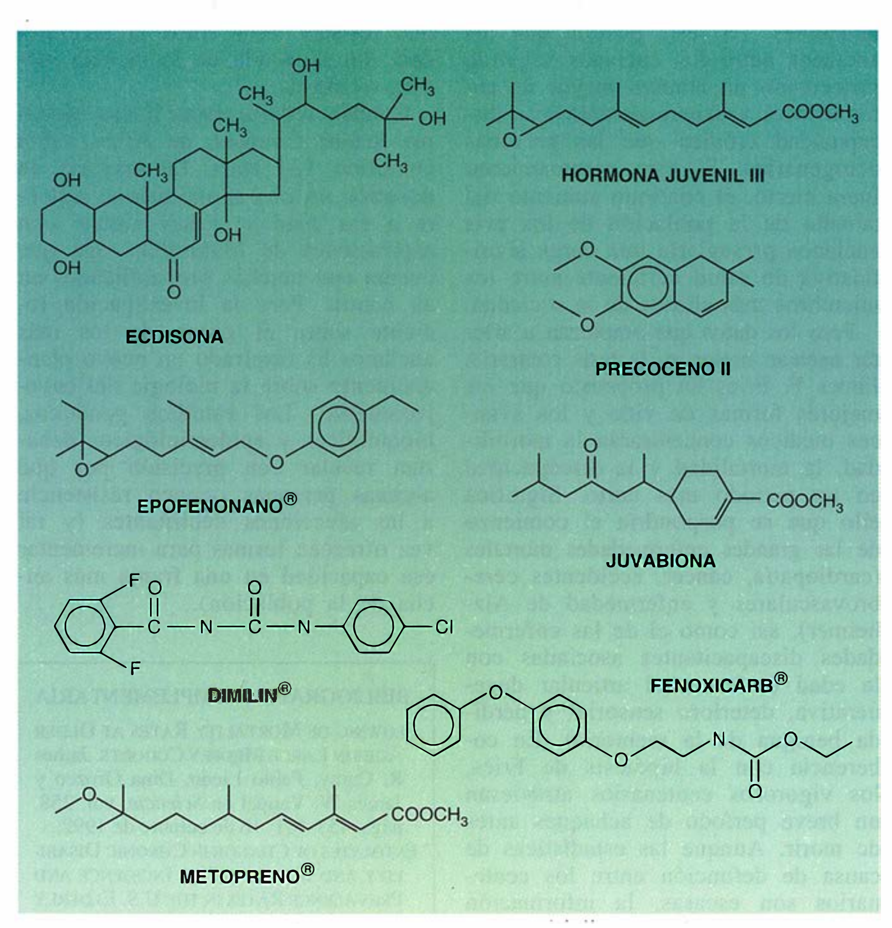
Control de plagas

Métodos bioquímicos

La humanidad está acostumbrada a los efectos devastadores de los insectos. Una descripción precoz de una plaga la encontramos en la Biblia; dentro de su sencillez, el texto del *Exodo* recoge el dramatismo asociado a los daños que causan las nubes de langosta entre los habitantes de la mayor parte de las zonas subtropicales: "La langosta invadió todo el país de Egipto, y se posó en todo el territorio egipcio, cubrieron toda la superficie del país hasta oscurecer la tierra, comieron toda la hierba, todos los frutos, no quedó nada verde ni en los árboles ni en las hierbas del campo en toda la tierra de Egipto."

A comienzos de la década de los ochenta, los países del norte de Africa se vieron afectados por una sucesión de invasiones de langosta, que arrasaron las mejores zonas agrícolas de Túnez, Marruecos y Argelia. Las ayudas enviadas por la Comunidad Europea para combatir la plaga ascendieron a cientos de millones de ecus.

Se hizo necesario el uso de insecticidas de alta capacidad tóxica, especialmente algunos organoclorados, cuyos residuos todavía persisten en las zonas más afectadas, dificultando enormemente la comercialización de los productos hortícolas. Pero las cosechas que se vieron directamente afectadas por la plaga se perdieron. Quedó claro que la aplicación de tóxicos potentes en el momento en que se sufría el ataque, no fue el mejor camino. Ante esa experiencia negativa, la Comunidad Europea ha impulsado en los últimos años la investigación de nuevas técnicas de control que permitan mayor eficacia y no resulten perjudiciales para el ambiente.



Estructura química de algunos compuestos que intervienen en el desarrollo y la reproducción de insectos. La ecdisona controla la muda; la hormona juvenil hace lo propio con la metamorfosis y la reproducción. Por su parte, el precoceno II es un antagonista de la hormona juvenil, en tanto que la juvabiona constituye el primer producto natural capaz de mimetizar la acción de la hormona juvenil

Las especies productoras de las plagas no siempre se encuentran formando las famosas "nubes de langosta". En sus zonas de origen, los insectos se hallan en formas solitarias, fuertemente territoriales, y los daños causados a la agricultura son mínimos. Sólo en determinadas condiciones ambientales se produce el cambio; los insectos pasan en dos o tres generaciones de la fase "solitaria" a la fase "gregaria", proliferan en gran número y forman las temibles "nubes".

Los conocimientos de la biología de las dos principales especies causantes de las plagas, *Schistocerca gregaria* y *Locusta migratoria*, han posibilitado a lo largo de los últimos treinta años el desarrollo de cuatro técnicas principales. En primer lugar, la alteración de las tasas de reproducción y desarrollo de los insectos; ello puede lograrse mediante productos agonistas o antagonistas de las hormonas relacionadas con la reproducción y el desarrollo, o mediante la alteración de los mecanismos reguladores internos de la síntesis de dichas hormonas, con el fin de evitar las explosiones demográficas determinantes de las plagas. (Llámase agonista el producto capaz de incrementar la actividad de una hormona; antagonista, el producto que disminuye o previene la acción de una hormona.)

La segunda alternativa consiste en el empleo de sustancias naturales con efectos de repelentes alimentarios, para desanimar los ataques a las plantaciones agrícolas, una vez formadas las "nubes". La tercera concierne a la obstrucción de los procesos fisiológicos que controlan el paso de fase solitaria a fase gregaria, al objeto de limitar la formación potencial de las bandadas. Y, por último, el recurso a feromonas, para seguir la evolución de las poblaciones en los lugares de origen y tratar de anticiparse a la formación de "nubes". Por sí sola, ninguna de las cuatro técnicas resulta completamente eficaz, si bien la primera y la tercera son complementarias.

En 1967, Carroll Williams, de la Universidad de Harvard, proponía el nacimiento de la tercera generación de insecticidas, que vinieron en lla-

marse "reguladores del crecimiento de los insectos". De las moléculas aludidas, la ecdisona y sus derivados presentan inconvenientes de uso, derivados de la semejanza que existe entre su estructura molecular y las de muchas hormonas propias de los vertebrados. Las más prometedoras, en principio, fueron las moléculas derivadas de la hormona juvenil. Tres de ellas, Metopreno, Epofenonano y Fenoxicarb son marcas comerciales y se emplean ya como agentes de control de plagas. Otra, el Dimilin, actúa entorpeciendo la deposición de cutícula y, por tanto, bloquea los procesos de muda.

Sin embargo, los derivados moleculares con acción agonista de la hormona juvenil no son los más recomendables cuando se trata de controlar plagas, como las de la langosta, cuyos daños son producidos por las larvas de la especie, ya que al interferir la metamorfosis prolongan los estadios en que se producen los mayores daños. Es evidente que en la temporada siguiente la plaga habrá quedado controlada al reducirse al mínimo el número de adultos reproductores viables, pero esto es un triste consuelo para el agricultor que ha perdido una buena parte de su cosecha.

El descubrimiento en 1976 por el grupo de William S. Bowers de los precocenos, que aceleran la metamorfosis y esterilizan a las hembras adultas, pareció que daba nuevos impulsos a esta opción de control. Pese a su eficacia contra *Locusta migratoria*, una de las especies causantes de las plagas de langosta, su reducidísimo espectro de actividad y su labilidad en condiciones de campo los ha mantenido más como herramientas de trabajo de laboratorio que como alternativa de control.

Las feromonas se emplearon, mediados los años setenta, frente a ciertas plagas, forestales sobre todo. No obstante el éxito de los primeros resultados, el seguimiento de los estudios ha demostrado que presentan inconvenientes graves, como pérdida de eficacia a las pocas generaciones y la necesidad de que se den condiciones meteorológicas excepcionales para que los tratamientos resulten efectivos.

El empleo de sustancias con actividad de repelente alimentario puede resultar adecuado cuando el ataque de la plaga se centra en determinadas especies vegetales, pero resulta muy complejo de llevar a cabo cuando se trata de controlar especies polífagas (las langostas), capaces de atacar cualquier sembrado. Los repelentes alimentarios sólo sirven ante un número de insectos reducido, pero si éstos han proliferado el producto pierde eficacia, ya que la tendencia a la gregarización y la atracción hacia las fuentes de alimento sobrepasan los efectos repulsivos de casi todas las sustancias conocidas.



Efectos de la hormona juvenil sobre Locusta migratoria. *A la izquierda aparece un macho control, es decir, sin tratamiento; en el centro, ninfa que ha sufrido una muda supernumeraria y, a la derecha, un macho metatélico*

La mejor solución al problema parece descansar en el empleo coordinado de las cuatro técnicas descritas. Las feromonas, empleadas como agentes de seguimiento poblacional, proporcionan informaciones muy valiosas sobre la dinámica y la evolución de los grupos en las áreas proclives a la aparición de la fase gregaria. Al mismo tiempo permiten detectar, con relativa facilidad, la aparición en la población de individuos con caracteres intermedios entre las fases "solitaria" y "gregaria", posibilitando, de este modo, la toma de las medidas de prevención más oportunas.

El uso de la información adquirida mediante el empleo de feromonas permite que los productos agonistas y antagonistas hormonales puedan emplearse en los momentos en que su eficacia resulte máxima. Si se consigue una caída notable de la población, o se alteran las tendencias de gregarización, su uso puede combinarse con el de sustancias repelentes alimentarias, reduciéndose así las zonas afectadas por los tratamientos, con el aumento consiguiente en la eficacia de los mismos.

Cada una de las técnicas citadas presenta considerables limitaciones en su aplicación, que se agravan con la necesidad de personal preparado para acometer los tratamientos y la evaluación de los resultados. Por ello resulta imprescindible la continuación de los esfuerzos de investigación, que recientemente se han centrado en el estudio de los neuropéptidos que regulan la síntesis y liberación de las hormonas por los insectos.

Aumenta por días el número de péptidos descubiertos en el sistema nervioso central de los insectos. Menos deprisa avanza el conocimiento de su función biológica, aunque algo se ha progresado en los que se relacionan con el control de la síntesis y liberación de hormona juvenil (allatotropinas y allatoinhibinas), con el control de la producción de feromonas (LOM-AG, P-BAN, etcétera) o con los mecanismos de regulación del balance hídrico (neuroparsinas). Nuestro equipo de la Universidad de Valencia participa en un proyecto financiado por la Comunidad Europea en el programa STD III, sobre las posibilidades de empleo de estos neuropéptidos como agentes de control, solos o en combinación con otros reguladores del crecimiento.

Podría objetarse la incapacidad de los péptidos para atravesar la cutícula externa de los insectos, dado el carácter extremadamente hidrofóbico de la composición de ésta. Pero las técnicas del ADN recombinante, que permiten manipular los genes responsables de la síntesis de estos péptidos y su inclusión en organismos de gran capacidad de infección, arrojan una luz de esperanza en el progreso de estas alternativas, que en sí mismas representan una revolución en el desarrollo de nuevas tecnologías de

control de plagas capaces de superar y sustituir a las actualmente en uso.

RAFAEL MARTÍNEZ PARDO
M.ª DOLORES GARCERÁ ZAMORANO
Departamento de biología animal
de la Universidad de Valencia

Asfaltenos

Características y uso futuro

El petróleo es una mezcla compleja de tres integrantes, a saber, compuestos hidrocarbonados, compuestos con heteroátomos (oxígeno, nitrógeno y azufre) y pequeñas cantidades de metales de transición. Precisando más, podemos considerarlo constituido por tres fracciones principales: aceites (saturados y aromáticos), resinas y asfaltenos.

La separación de estas fracciones se realiza gracias a su funcionalidad y masa molecular, dos características más o menos independientes, que tienen como consecuencia la insolubilidad de una parte del petróleo en hidrocarburos saturados lineales de peso molecular medio bajo.

Los asfaltenos constituyen la parte más pesada del petróleo y están definidos como la fracción del crudo insoluble en hidrocarburos saturados lineales (*n*-pentano o *n*-heptano) y soluble en benceno. Los metales habituales en el petróleo son el níquel y el vanadio, cuya concentración, variable, oscila entre 50 y 400 partes por millón para el primero y alrededor de 6000 para el segundo. Esos metales están ligados, en parte, a compuestos orgánicos complejos con heteroátomos (oxígeno o nitrógeno) y en parte con el azufre.

La mayoría de los metales y heteroátomos contenidos en el petróleo bruto (del orden del 80 %) se encuentran en los asfaltenos. Estos no suelen encuadrarse en una estructura definida, sino que parece más acertado describirlos a través de varias estructuras. Conviene saber, sin embargo, que los ensayos fisicoquímicos realizados para aislar los asfaltenos se han efectuado sobre productos separados por precipitación y no en suspensión en su medio natural, lo que conlleva el riesgo de imponer ciertas limitaciones por la posibilidad de modificar su estructura, composición o propiedades. La técnica de resonancia magnética nuclear ha permitido comprobar que los asfaltenos son macromoléculas constituidas por la condensación de anillos bencénicos y y nafténicos sobre los que se insertan lateralmente cadenas hidrocarbonadas.

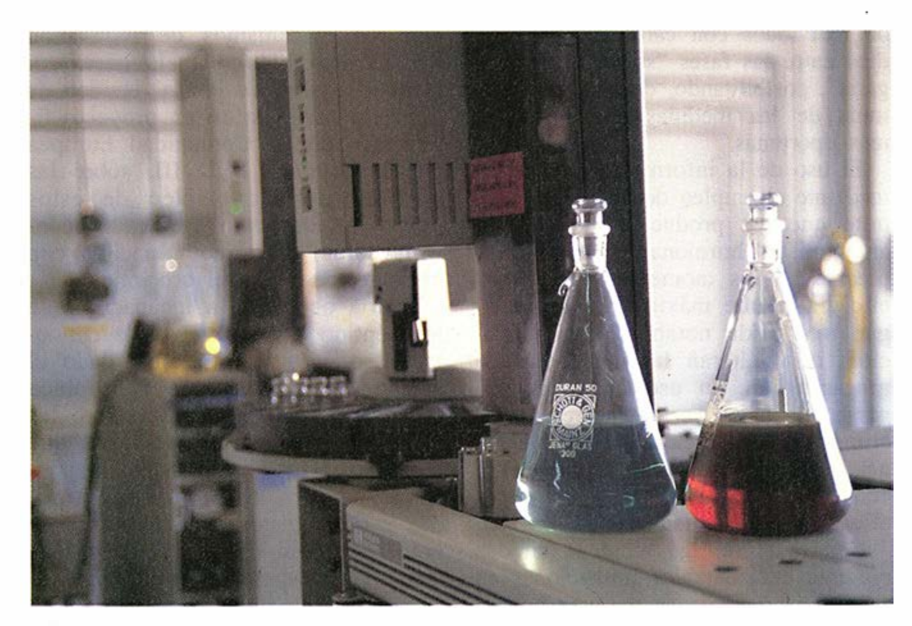
Con estas consideraciones se pueden proponer diversas estructuras moleculares. El número de ciclos bencénicos o nafténicos condensados es bastante elevado y las cadenas hidrocarbonadas pueden ser o bien grupos metilo ($-CH_3$) o bien lineales alargadas ($-CH_2-(CH_2)_n-CH_3$), con diversos grupos funcionales.

Se ha podido comprobar por diversas técnicas que en los asfaltenos existen grupos hidroxilos ligados, ésteres, pirroles o indoles. Como pueden formar puentes de hidrógeno con el fenol se supone que poseen terminales de tipo básico. Mediante el fraccionamiento de los asfaltenos utilizando resinas intercambiadoras, se ha conseguido aislar una serie de fracciones en función de su acidez o basicidad, lo que ha permitido que se puedan establecer los grupos terminales por espectrofotometría infrarroja. Así, se ha podido comprobar que, en las fracciones que presentan alta acidez, se encuentran grupos terminales carboxílicos ($-COOH$), mientras que en las de acidez media o débil se hallan grupos fenoles, pirroles o amidas ($-CONH_2$). En las fracciones neutras se ha encontrado que los grupos terminales son hidrocarburos saturados o bencénicos; en la fracción básica, los grupos terminales son aminas ($-NH_2$), piridina o compuestos con base en el anillo bencénico.

Sobre el peso molecular de los asfaltenos discrepan los investigadores. Discrepancia que se debe, entre otras cosas, a las técnicas de aislamiento utilizadas, ya que pueden dar lugar tanto a condensaciones como a rupturas de enlaces, de lo que resulta en el primer caso un peso molecular mayor y en el segundo, otro menor. Mediante sedimentación se han obtenido valores del orden de 50.000 a 300.000, mientras que por otros medios los valores obtenidos son mucho más bajos, del orden de 1000 a 10.000. Los resultados de las últimas investigaciones parecen confirmar los primeros valores.

La importancia de la presencia de los asfaltenos en el petróleo crudo viene derivada de la posibilidad de que estos terminen en los fuelóleos utilizados para motores lentos o en calefacción, ya que hoy en día estos fuelóleos preparados en las refinerías no son los residuos de la separación de los productos más ligeros, sino que proceden de la mezcla selectiva de residuos y destilados, con el fin de producir una variedad de combustibles que sean aplicables en un amplio rango de operaciones industriales y domésticas. La naturaleza del fuel así producido va a depender mucho de las características del crudo y de la composición de las mezclas realizadas.

Los combustibles pertenecientes a esta categoría se utilizan en los motores diésel lentos y también en las instalaciones de calefacción de cualquier potencia. Según las características del aparato quemador se empleará un fuel más o menos pesado, caracterizado por su viscosidad. Los fuelóleos más viscosos se preparan mezclando diversos residuos pesados, con lo que pueden presentar un alto contenido en asfaltenos, que son los productos más difíciles de quemar y, además, por su contenido en hetero-



Matraces que contienen aceites de petróleo (color claro) *y asfaltenos* (color obscuro)

átomos y metales pesados constituyen una fuente de contaminación atmosférica, provocando asimismo la corrosión de las instalaciones de quemado.

En estos momentos los problemas que su combustión produce en el medio ambiente y en las instalaciones quemadoras han provocado que los asfaltenos se deriven hacia las instalaciones de productos ligeros, ya sea por hidrogenación o craking. Por estas razones, es de esperar que dentro de unos años la única utilización de los productos de las refinerías con alto contenido en asfaltenos sea para la fabricación de betunes.

DIEGO JUAN GARCÍA
JOAQUÍN JUAN AGÜERA
Grupo de Investigación Inquica.
Dpto. de Ingeniería Química.
Escuela Politécnica Superior
de Cartagena

Macromoléculas biológicas

Estructura tridimensional

La existencia en España de laboratorios de investigación en cristalografía de macromoléculas biológicas es reciente. Las macromoléculas biológicas que más abundan en los organismos son las proteínas. Están formadas por la unión química (enlace peptídico) entre aminoácidos, que originan cadenas de gran longitud y, por tanto, con peso molecular muy grande. La secuencia constituida por la unión de aminoácidos (de los que hay una veintena en la naturaleza) para formar las cadenas polipeptídicas se denomina *estructura primaria*, cuyo plegamiento, más o menos regular, en hélices y láminas, determina su *estructura secundaria*.

La estabilidad tridimensional de ese plegamiento se debe fundamentalmente a interacciones intramoleculares (enlaces de hidrógeno); la distribución espacial de estos pliegues define su *estructura terciaria*. Por último, el agrupamiento de distintas moléculas en subunidades de un complejo superproteico integra la *estructura cuaternaria*. La estructura primaria, específica para cada proteína, es la que, junto a sus estructuras secundaria, terciaria y cuaternaria, confieren a la proteína una funcionalidad biológica específica.

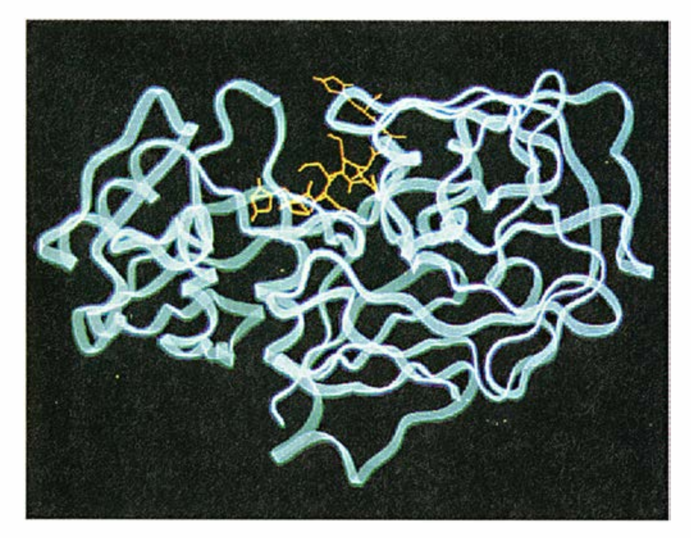
El desarrollo actual de la biotecnología y de la ingeniería molecular ha puesto de manifiesto la necesidad de conocer la estructura tridimensional (terciaria y cuaternaria) de las macromoléculas biológicas (proteínas, ácidos nucleicos y complejos multimacromoleculares). El establecimiento de procedimientos para la obtención de nuevas proteínas con actividad biológica mejorada, distinta, sólo puede plantearse desde su estructura tridimensional a nivel atómico.

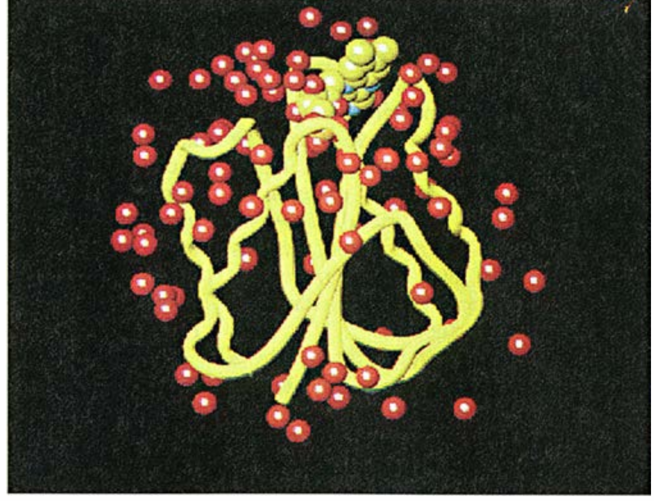
Para la determinación de la estructura tridimensional de las macromoléculas biológicas disponemos de técnicas químico-físicas aplicables tanto en disolución como en su forma sólida (cristalina). Así, la resonancia magnética nuclear (RMN), aunque limitada a moléculas de un peso inferior a 25.000 dalton, proporciona información estructural de las moléculas en disolución; ofrece también datos sobre procesos cinéticos y dinámicos implicados, por ejemplo, en los procesos de plegamiento de las proteínas.

La cristalografía de rayos X, aplicada al estudio de los cristales de macromoléculas biológicas, es la técnica que más ha influido en el conocimiento de la bioquímica estructural. Requiere una muestra cristalina (sólido ordenado). Los cristales de proteínas y demás macromoléculas biológicas contienen una gran cantidad de disolvente (normalmente agua, en una proporción entre el 20 y el 80 %) que rellena los huecos que dejan las moléculas al empaquetarse en los cristales y hace que la interacción entre ellas en el cristal sea muy débil. Por tanto, la forma molecular individual, la estructura tridimensional, se ve muy poco afectada por la existencia de moléculas vecinas y resulta muy parecida, si no idéntica, a la existente en el medio fisiológico. La cristalografía de rayos X se aplica no sólo al estudio de la estructura de proteínas sino también a virus, ácidos nucleicos y complejos nucleoproteicos.

Los modelos de la estructura tridimensional pueden representarse mediante dibujos como los de la figura. En ocasiones se suele utilizar una especie de cinta (azul a la izquierda, amarilla a la derecha) que hace las veces de cadena polipeptídica y que por tanto muestra su plegamiento espacial. En otros casos, determinados grupos se resaltan mediante un modelo de esferas interpenetradas y la existencia de moléculas ordenadas de agua de hidratación se pone de manifiesto mediante esferas rojas que aparecen en la parte derecha de la ilustración inferior.

Las estructuras tridimensionales que se muestran en la figura correspon-





Modelos de estructura tridimensional: a la izquierda, modelo de la enzima endotiapepsina (cintas) *acomplejado con un inhibidor* (líneas finas)*; a la derecha, modelo de la flavodoxina* (cintas) *procedente de* Desulfovibrio desulfuricans *ATTCC-27774* (*el grupo prostético se muestra mediante un modelo de esferas interpenetradas*)

den a modelos obtenidos mediante técnicas cristalográficas de difracción de rayos X. El péptido (líneas finas) representado a la izquierda ha sido diseñado y sintetizado para inhibir la acción de la quimosina, enzima que inicia el proceso de coagulación de la leche mediante hidrólisis de la caseína-K. El estudio de complejos de este tipo permite definir las zonas de interacción con el receptor y, por tanto, elevar la eficacia de inhibición mediante la modificación estructural del acoplamiento entre enzima e inhibidor. El modelo representado a la derecha corresponde a la estructura tridimensional de una flavodoxina perteneciente a un grupo de proteínas implicadas en procesos de transferencia electrónica y que presenta el potencial redox E2 más positivo dentro de la familia. Debido a que la modulación de dicho potencial está estrechamente relacionada con la fuerza del enlace entre el grupo prostético FMN y la apoproteína, la resolución de esta estructura permitió encontrar repulsiones electrostáticas desfavorables que dan cuenta del elevado potencial redox.

MARTÍN MARTÍNEZ-RIPOLL,
ANTONIO ROMERO
JULIANA SANZ
Departamento de Cristalografía
Instituto de Química Física
Rocasolano, CSIC
Madrid

Recursos marinos

El proceso IIM

La producción mejillonera de las Rías Bajas —casi la mitad de la mundial y cuyos dos tercios se concentran en la Ría de Arosa— es de unas 250.000 toneladas por año. El 60-70 % del recurso (con tendencia creciente) se elabora por diversas vías con un paso previo común que genera 60-80 millones de litros de efluentes (EPM) con una alta carga contaminante: su demanda química de oxígeno (DQO, o aporte de oxígeno que requiere la degradación de sus solutos) es de unos 25 gramos por litro y su componente mayoritario es el polisacárido glucógeno.

Los EPM se vierten libremente a las aguas litorales, donde contribuyen a la eutrofización del sistema con deriva hacia estados mucho menos interesantes desde el punto de vista de la calidad y diversidad de sus recursos autorrenovables. Comienzan a detectarse síntomas serios del daño, así como conflictos de intereses con otros sectores (acuicultura). Aunque el problema ha venido preocupando desde hace tiempo, varios procedimientos convencionales de depuración, así como algunos intentos ordenados a la recuperación directa de algunos de los componentes de los EPM, no han resultado ni plenamente satisfactorios, ni aplicables a la necesaria escala masiva.

Durante los últimos años, en el Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC) de Vigo se ha venido trabajando en el desarrollo de un sistema que, basado en la utilización de los EPM como medio de cultivo microbiano, pudiera dirigirse simultánea o alternativamente hacia una serie de objetivos de diferente complejidad, tiempo de proceso y valor añadido, generando así incentivos que facilitaran la adopción de técnicas de reciclado. Básicamente, el planteamiento comprende dos vías: una simple, rápida y principalmente depurativa; otra más compleja y lenta, pero valorativa. Ambos desarrollos se han completado tanto en cultivo sumergido, como en cultivo en estado sólido. Este último recurso, aplicado a sistemas de soportes particulados de diferente porosidad, nutricionalmente inertes y de bajo precio o residuales (carozo de maíz, espumas de poliuretano de diferentes densidades), ha conseguido elevar los rendimientos y reducir sensiblemente las exigencias técnicas, energéticas y de capital.

En la primera vía, los EPM, clarificados a través de un paso que permite ya recuperar de modo eficiente una fracción proteica apta como aditivo alimentario, se utilizan como medio para el cultivo de microhongos amilolíticos, esto es, capaces de emplear, por fuente de carbono, polisacáridos como el glucógeno que contiene el efluente. En menos de 48 horas el crecimiento microbiano elimina alrededor del 90 % de la DQO inicial, produce una biomasa apta como pienso, con bajos niveles de ácidos nucleicos, y deja en los líquidos postincubados las enzimas extracelulares (amilasas: α-amilasa y glucoamilasa) que permitieron a los microorganismos aprovechar aquella fuente de carbono. Tales enzimas son recuperables sin mayores dificultades por ultrafiltración.

La segunda vía requiere medios más concentrados, y capaces, por otra parte, de eludir la dependencia de los microorganismos amilolíticos que, en la primera, impone la presencia de glucógeno como fuente de carbono. El elevado peso molecular (por encima de los 100 kilodalton) que el polisacárido conserva en el efluente clarificado permite concentrarlo por ultrafiltración con una notable eficiencia; mucho mayor, por poner un ejemplo, de la usual en el proceso análogo que se aplica a la depuración y rentabilización del suero lácteo.

Es fácil alcanzar así niveles de 100-120 g/L de glucógeno y controlar al mismo tiempo las concentraciones de nutrientes de bajo peso molecular, que interfirirían en ciertas bioproducciones posteriores. Una parte de las amilasas producto de la primera vía se aplica a la conversión en glucosa (sacarificación) del glucógeno presente en el concentrado. Aun siendo posible una conversión total, se ha comprobado que a menudo resulta preferible una hidrólisis sólo parcial, por añadidura más rápida y barata. Se obtiene de este modo un medio rico en glucosa, la fuente de carbono más versátil de todas, con un bajo nivel de sales, pequeñas concentraciones de proteínas y trazas de vitaminas, lo que constituye un sustrato adecuado para casi cualquier producción microbiana. Los rendimientos obtenidos a partir de aquí en las producciones de ácido giberélico, ácido glucónico y glucosa oxidasa se encuentran por encima de los valores que se consideran comercialmente rentables. De menor entidad, aunque lejos de carecer de importancia, es la de ácido cítrico.

En la figura adjunta se presenta un diagrama esquemático del tratamiento (*proceso IIM*), que incluye todas las líneas con resultados positivos a escalas que se sitúan, por el momento, entre 2-60 litros (bioproducciones) y 500-1000 litros (operaciones previas). En él aparecen dos líneas sin interés práctico: una, la obtención de glucógeno, producto caro, pero de mercado exiguo; otra, la del etanol, excedentario en España, pero que sugiere la homologabilidad del medio logrado.

Se ha creado así una red —todavía abierta— de bioprocesos, con perspectivas razonables de viabilidad económica y que, con EPM como materia prima única, cuya DQO queda reducida al 5-10 % de su valor inicial, genera con rendimientos apreciables proteína de calidad alimento, proteína unicelular de calidad pienso, amilasas (enzimas con amplia aplicación en sectores como el azucarero y panadero), ácido giberélico (en cervecería, fruticultura, floricultura), glucosa oxidasa, ácido glucónico y ácido cítrico (usos variados en la industria química y alimentaria), serie de productos que en la actualidad España obtiene mayoritaria o totalmente por importación.

Utilizar la versatilidad metabólica de los microorganismos para promover la conversión de un residuo en recurso constituye una de las opciones más realistas para los problemas de contaminación asociados a la industria alimentaria, con cierta tradición ya en el campo agrícola, donde destaca el ejemplo de las melazas azucareras.

Sin embargo, los sectores industriales que se dedican a la producción marina, debido a la "comodidad" del emplazamiento litoral, la laxitud legislativa y la falsa mitología del mar como fuente inagotable de recursos y sumidero irrellenable de desechos, se encuentran por el momento sensiblemente más atrasados en lo que respecta a optimizar el uso de sus materias primas y reprocesar sus residuos.

El *proceso IIM* podría constituir un primer paso en este sentido. Dos patentes (propiedad del CSIC) cubren parte de sus resultados. En 1993 se firmó un convenio Junta de Galicia-CSIC por el que la primera se compromete a un importante apoyo financiero de las empresas que lo apliquen, y el Centro Europeo de Empresas e Innovación de Galicia (BIC-Galicia) ha realizado un estudio de viabilidad y valorado como rentable un proyecto empresarial con esta base.

MIGUEL ANXO MURADO
Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC). Vigo

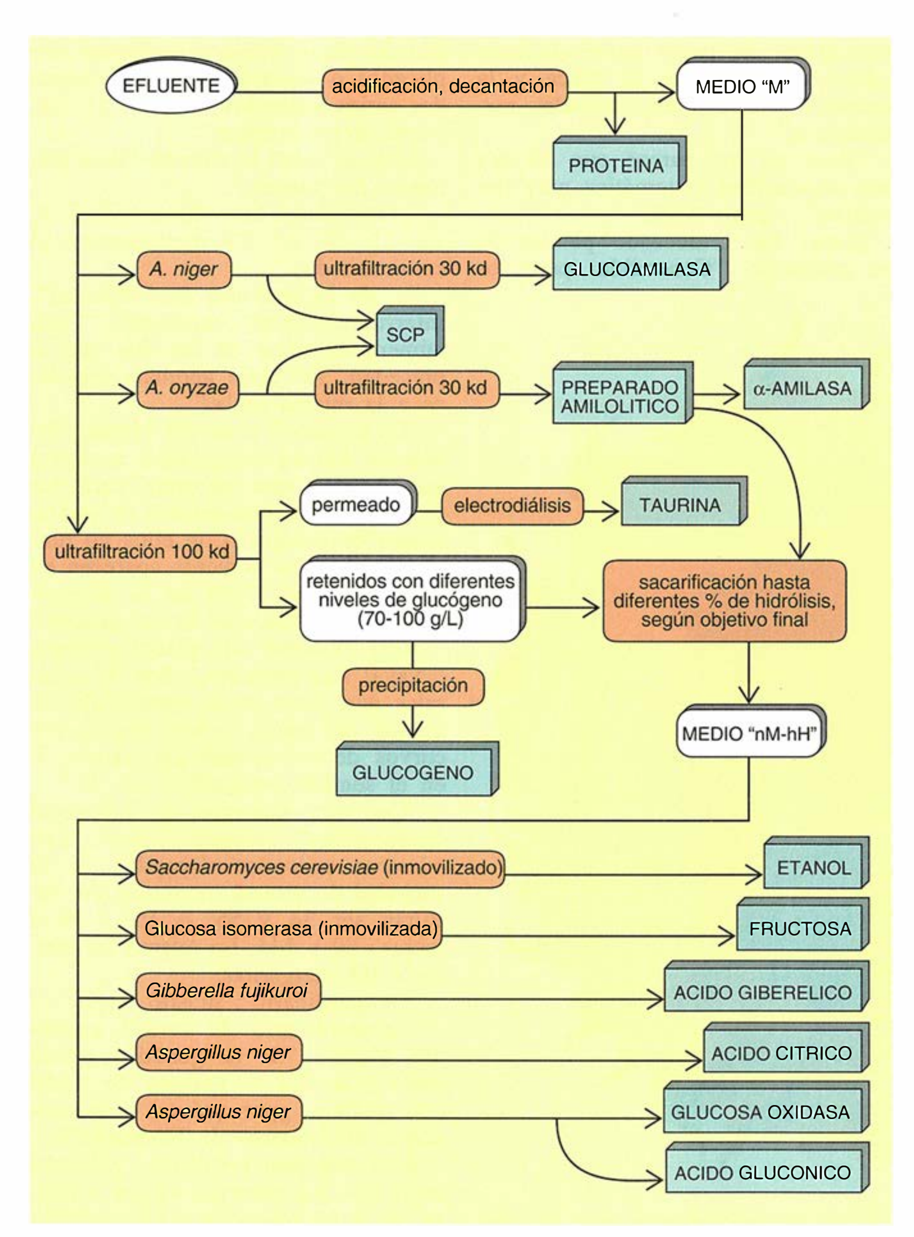


Diagrama esquemático del conjunto de operaciones y productos útiles (en negrita) *que resultan del proceso IIM para la valorización de los efluentes del procesado de mejillón.* (*de Murado & al., 1993, 1994, ligeramente modificado*)

Investigación

En la construcción

La industria de la construcción tiene gran importancia económica en los países avanzados. En España, y de acuerdo con las estadísticas de 1993, ese sector alcanza el 8,2 % del producto interior bruto, supone el 67,5 % de la formación bruta de capital fijo y ocupa el 9,2 % de la población empleada.

Sin embargo, el nivel de gasto en investigación y desarrollo tecnológico dedicado a la construcción es bajo en relación con el gasto global por este concepto en casi todos los países, salvo en Japón. En la Unión Europea el esfuerzo de investigación en construcción oscila entre el 0,5 % y 3 % del esfuerzo total en investigación que, a su vez, varía entre el 0,5 y 2,9 % del PIB (en España el 0,85 % en 1993). La búsqueda de una reducción de los gastos de mantenimiento de lo construido (edificios, infraestructuras, etcétera) justificaría por sí misma mayores esfuerzos en investigación. Pero las características singulares de esta industria (su fragmentación, la diversidad de agentes, su localización dispersa y la multiplicidad de productos) hacen que sea difícil un avance continuado significativo.

Por otra parte, esta industria se enfrenta a numerosos retos: mayores requerimientos derivados de las políticas medioambientales, necesidad de reducir los consumos de energía, exigencias para mejorar el confort de los edificios y condicionamientos derivados de otros sectores industriales que son usuarios finales de la construcción.

Los programas europeos y nacionales han supuesto un importante estímulo para que las empresas se animen a profundizar en el desarrollo de métodos y procesos que mejoren su competitividad. Aunque no hay programas comunitarios de investigación y desarrollo tecnológico específicos para la industria de la construcción, buena parte de los proyectos pueden encuadrarse en el programa BRITE-EURAM relativo a tecnologías industriales y de materiales, así como en el programa ESPRIT dirigido a las tecnologías de la información. Algunos proyectos en curso se orientan a la investigación sobre hormigones con altas prestaciones, hormigones proyectados, robotización de la fabricación de panales de fachadas y otros.

JUAN M. MORÓN GARCÍA
Dragados y Construcciones. Madrid

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Deshojando la margarita

Las abejas zumbaban soñolientas, el sol lanzaba sus rayos y los girasoles se cimbreaban movidos por la brisa. Abel, el pastorcillo, sesteaba bajo un árbol mientras Mabel, la cuidadora de los gansos, tejía guirnaldas de margaritas. La chica se paró de pronto.

"¡Abel! Acabo de encontrar una margarita de 31 pétalos. Normalmente esta variedad tiene 34."

Abel se incorporó y desperezó. "¿De veras? Resulta curioso que tengan un número fijo. Aunque supongo que los genes de la flor habrán de especificar..."

"No veo por qué. Entiéndeme, los genes le dicen a la planta cómo fabricar clorofila, pero no le mandan que la coloree de verde. Eso es cosa de la química, no de la genética."

Abel ya había discutido este asunto con la mozuela. "Sí, claro. Ciertos rasgos morfológicos de los seres vivos son de origen genético, mientras que otros son consecuencia de la física, la química y la dinámica del crecimiento."

"Exacto", asintió Mabel. "La genética puede ser causa de muchísimas cosas, mientras que la física y la química producen regularidades matemáticas."

"Pues no me parece que 34 sea una regularidad matemática muy llamativa", repuso Abel.

Mabel fue arrancando pétalos de su margarita. "Concedido, pero los números que aparecen en las plantas —y no me refiero sólo a los pétalos, sino a características de todo tipo— son por lo común muy especiales. Las azucenas tienen tres pétalos, los ranúnculos cinco, las caléndulas 13, el áster 21 y casi todas las margaritas tienen 34, 55 u 89. No es muy frecuente encontrar otros números. Las principales excepciones se dan cuando estos números aparecen duplicados o cuando surgen las llamadas series anómalas: 3, 4, 7, 11, 18, y así sucesivamente."

Abel se rascó la cabeza. "Esos números me suenan."

"¡Pues claro! Los números 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89 corresponden al comienzo de..."

"... de la sucesión de Fibonacci", interrumpió Abel exultante. "Cada número es suma de los dos que le preceden. Tu 'serie anómala' obedece a la misma regla."

"De acuerdo", concedió Mabel. "Fibonacci fue un matemático medieval que inventó esta sucesión para dar un modelo del crecimiento de poblaciones de conejos. Con ellos no funcionó, pero sus números aparecen en muchos sitios. Fíjate en la disposición de los flósculos de un girasol."

Abel examinó una planta cercana. "¡Vaya! Las espirales... hay 34 espirales que giran en el sentido de las agujas del reloj, como los brazos curvos de un volante de inercia. Y en el sentido antihorario hay 55."

"Que son números de Fibonacci consecutivos", remachó Mabel. "Los números concretos dependen de la variedad de girasol, pero siempre resultan ser 34 y 55, o 55 y 89 e incluso 89 y 144. Lo mismo les ocurre a las margaritas."

"Extraordinario", musitó Abel.

"Extraordinario de veras", concedió Mabel. "Si la genética puede darle a la flor el número de flores que prefiera, ¿por qué tal preponderancia de números de Fibonacci?"

Abel chasqueó los dedos. "¿Quieres decir que los números surgen a causa de algún mecanismo matemático? ¿Que la física, o la química o la..."

"Dinámica", atajó Mabel.

"¿Es que ha habido quien haya ex-



1. La cabezuela del girasol, al igual que la de las margaritas y otras muchas flores, contiene dos familias de espirales entrecruzadas, una de las cuales gira en sentido horario y la otra, en el antihorario. Ciertos modelos muestran que esta configuración regular es resultado de la dinámica del crecimiento vegetal

plicado la forma en que el crecimiento de las plantas puede originar números de Fibonacci?", preguntó Abel.

"Bueno, han sido muchísimos los que han propuesto explicaciones de muy distintas clases. Pero en mi opinión, la más impresionante se debe a Stéphane Douady e Ives Couder, del Laboratorio de Física Estadística de París. Recientemente han demostrado que la dinámica del crecimiento vegetal podría explicar la aparición de los números de Fibonacci... y otras muchas cosas."

"La idea fundamental es antigua", prosiguió Mabel. "Si nos fijamos en el meristemo apical del tallo podremos detectar las piezas a partir de las cuales se formarán todos los elementos principales de la planta: hojas, pétalos, sépalos, flósculos o lo que sea. De ese tejido indiferenciado van emergiendo unos abultamientos diminutos llamados primordios. Cada primordio emigra, alejándose del ápice, y acaba convirtiéndose en una hoja, un pétalo u otro elemento similar. Así que habrá que explicar por qué vamos encontrando en los primordios figuras espirales y números de Fibonacci."

"¿Cómo?", quiso saber Abel.

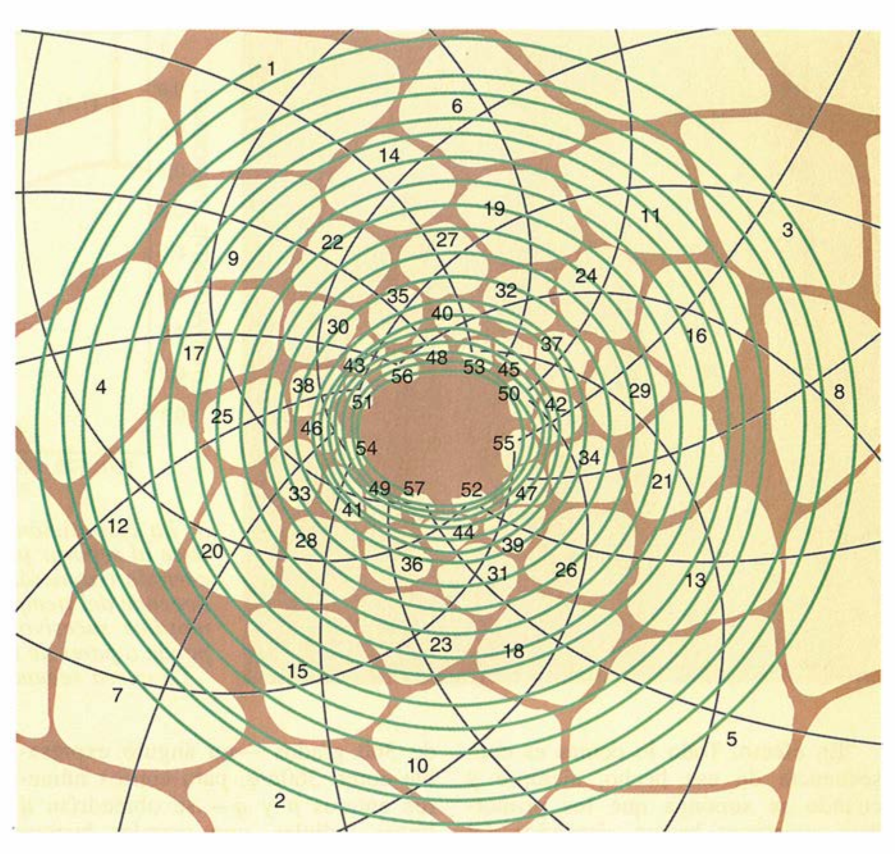
"El primer paso consiste en observar que las espirales más evidentes —los parastiquios— no son fundamentales. La espiral más importante se forma al considerar los primordios en su orden de aparición. Los primordios que aparecen antes son los que más se desplazan, por lo que resulta posible deducir su orden a partir de su distancia al ápice. Se descubre que los primordios están distribuidos con bastante separación a lo largo de una espiral estrechamente arrollada, llamada espiral generativa. ¿Me sigues hasta aquí, Abel?"

"Sin dificultad. Pero, ¿por qué forman espirales los primordios?"

"Eso vendrá dentro de poco. El cristalógrafo Auguste Bravais, uno de los fundadores de esa ciencia, y su hermano Louis observaron en 1837 un rasgo cuantitativo esencial. Trazaron líneas desde el centro de cada primordio hasta el centro del ápice y midieron los ángulos entre primordios sucesivos, vistos desde el centro del ápice. Fíjate en el ángulo que separa los primordios 29 y 30, o los 30 y 31. ¿Qué observas?"

Abel casi se queda estrábico. "Parecen iguales."

"Exactamente. Los sucesivos ángulos son prácticamente iguales; su valor común se llama ángulo de divergencia. Los primordios se encuentran sobre la espiral generativa separados una misma distancia angular. ¿Cuánto crees que mide el ángulo de divergencia?"



*2. Los primordios, numerados de 1 a 57, aparecen en secuencia a lo largo de una espiral muy cerrada (*verde*). Hay otras 21 espirales más evidentes, llamadas parastiquios. Ocho parastiquios se curvan en sentido horario, mientras que 13 corren en sentido antihorario (*negro*)*

"Es bastante grande; mayor que un ángulo recto, desde luego."

"Bien. Normalmente, su valor está cercano a 137,5 grados." Mabel parecía complacida consigo misma, aunque Abel no sabía por qué.

"Toma números consecutivos en la sucesión de Fibonacci", empezó a explicar Mabel.

"¿Como 34 y 55?"

"Eso es. Forma ahora la fracción 34/55 y multiplica por 360 grados."

Abel extrajo la calculadora de bolsillo que solía utilizar para controlar los piensos. "Humm... Resulta 222,5 y un poco más."

"Los ángulos se pueden medir externa o internamente. Tu resultado es mayor que 180 grados, así que réstaselo a 360."

"Muy bien." Abel pulsó los números en la calculadora. "Son 137,5 grados."

"Ya lo tienes. Al ir creciendo los números de Fibonacci, la razón de los términos consecutivos se aproxima a 0,618034, que es $(\sqrt{5} - 1)/2$, el llamado número áureo, que se denota por la letra griega fi, φ."

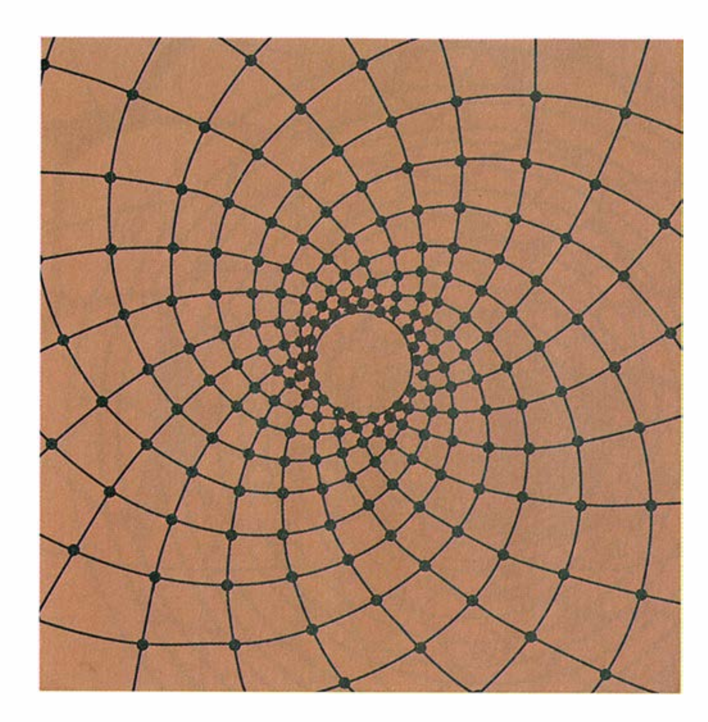
"Yo creía que el número áureo era $(\sqrt{5} + 1)/2$," se quejó Abel.

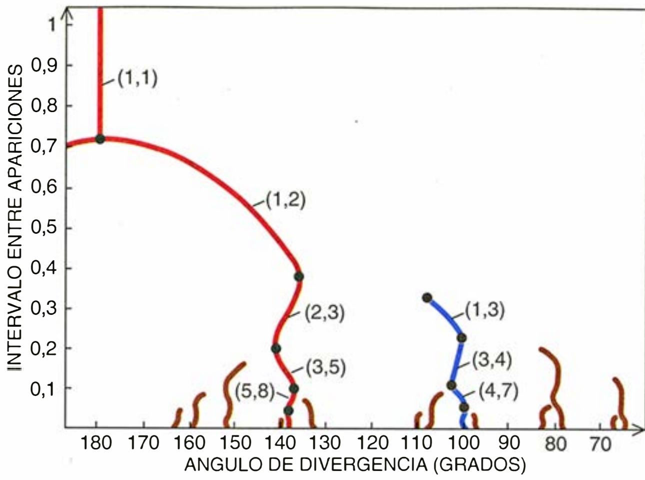
"Eso vale 1,618034. El número áureo es igual tanto a $1 + \varphi$ como a $1/\varphi$. Si se toma la razón en sentido inverso, como en $55/34 = 1,6176$, por ejemplo, resulta que el límite de las razones de Fibonacci, al ir creciendo los números, tiende en cambio hacia 1,618034. En cualquier caso, la clave de todo el asunto reside en el 'ángulo áureo', que vale $360\,(1 - \varphi)$ grados, o sea, aproximadamente 137,50776 grados. Los hermanos Bravais observaron que el ángulo entre primordios sucesivos se aproxima mucho al ángulo áureo."

"Entendido."

"Si vamos situando cada 137,5 grados puntos sucesivos sobre una espiral muy cerrada, debido a la forma en que van alineándose los puntos vecinos resultan dos familias de espirales que se interpenetran. Y a causa de la relación entre los números de Fibonacci y el número áureo, los números de espirales de las dos familias resultan ser números de Fibonacci consecutivos."

Abel se quedó unos momentos observando el revoloteo de las mariposas por el prado. "¿Así que todo se reduce a explicar por qué los primordios sucesivos están separados por el ángulo áureo?"





3. La disposición de primordios que vemos aquí se produce al separar por el ángulo áureo puntos de una espiral cerrada (izquierda)*. El número de parastiquios resultante depende del tiempo transcurrido entre la aparición de primordios sucesivos* (derecha)*. La curva principal corresponde a pares de números de Fibonacci consecutivos* (rojo)*. La curva secundaria origina la serie anómala* (azul)

"En efecto. Todo lo demás es consecuencia de ese hecho, siempre y cuando se suponga que los primordios sucesivos brotan alrededor del borde del ápice —como sugirió Wilhelm Hofmeister en 1868— y que se van alejando en dirección radial."

"¿Tiene alguna importancia la velocidad con que se muevan?", preguntó Abel.

"Desde luego que sí. A causa de la forma en que las plantas crecen, la migración de los primordios se va haciendo más rápida al crecer el radio, siendo su velocidad proporcional al radio."

"¿Y es en este punto donde interviene esta teoría de Douady y Couder?"

"Así es", dijo Mabel. "Fueron elaborando sus ideas a partir de una idea anterior. Si modelizamos las semillas de las plantas mediante discos o circulitos de radio fijo y las empaquetamos lo más estrechamente posible, manteniendo al mismo tiempo un ángulo de divergencia de 137,5 grados, entonces la n-ésima semilla (contando desde la más reciente hacia la más antigua) ha de encontrarse situada a una distancia proporcional a la raíz cuadrada de n. Por tanto, el ángulo áureo permite que las semillas queden empaquetadas con máxima eficiencia."

"¿Quieres repetir eso?"

"Bueno, supongamos que hicieras una estupidez y utilizases un ángulo de divergencia de 180 grados, que divide exactamente a 360 grados. En tal caso, los sucesivos primordios estarían situados a lo largo de dos semirrectas opuestas. De hecho, si se utilizase cualquier múltiplo racional de 360 grados —un ángulo expresable como $360p/q$, para ciertos números enteros p y q— se obtendrían q líneas radiales, con grandes huecos entre ellas."

Abel asintió con aire sapiente. "Y las semillas no quedarían eficientemente empaquetadas."

"Cabal. Para que así sea es necesario que el ángulo de divergencia sea un múltiplo irracional de 360 grados: cuanto más irracional, más eficiente. En teoría de números se sabe que el número áureo es el más irracional de todos los números."

Abel mostró signos de desconcierto. "¿Qué quiere decir eso de 'el más irracional'? Los números son irracionales o no lo son, ¿correcto?"

"Es cierto, sí, pero unos son más irracionales que otros. Acuérdate de que la razón de los sucesivos números de Fibonacci tiende hacia el número áureo φ. Por tanto, φ es el límite de la sucesión 2/3, 3/5, 5/8 y así sucesivamente. Estos cocientes son aproximaciones racionales que se acercan a φ, sin llegar nunca a alcanzarlo. Podemos medir cuán 'irracional' es φ mirando lo rápidamente que se contraen a cero las diferencias entre estas fracciones y φ. De hecho, en el caso de φ se contraen más lentamente que en el de cualquier otro número irracional."

"Por tanto, el número áureo se distingue de cualquier otro número basado en esta sencilla propiedad."

"Buena observación", le animó Mabel. "Bueno, pues Douady y Couder explicaron el ángulo áureo como una consecuencia de la dinámica, en lugar de postularlo directamente por la eficiencia del empaquetamiento. Supusieron que en el borde de un pequeño círculo —el ápice— se van formando elementos a iguales intervalos de tiempo. Estos elementos van después migrando en sentido radial con una cierta velocidad inicial, repeliéndose mutuamente; condición ésta que garantiza un movimiento continuo y hace que cada nuevo elemento aparezca lo más alejado posible de sus predecesores."

"¿Quieres decir que brotan donde hay más hueco?", aclaró Abel.

"Tienes una forma deliciosa de decirlo. Se puede apostar a que tal sistema producirá un empaquetamiento eficiente, por lo que sería de esperar que el ángulo áureo surgiera 'de motu proprio'. Y así es..., aunque con algunos aderezos interesantes."

"¿Cuáles?"

"Hay dos formas de averiguar lo que ocurre. Una consiste en realizar un experimento, como hicieron Douady y Couder. Sin embargo, en lugar de usar plantas, llenaron de silicona un plato circular y lo situaron en un campo magnético vertical. A continuación dejaron caer gota a gota pequeñas cantidades de fluido magnético en el centro del disco. El campo magnético polarizaba las gotas, que por ello se repelían mutuamente. Para dirigir las gotas en dirección radial aumentaron el campo magnético en el borde del disco. Las configuraciones que fueron surgiendo dependían del lapso de tiempo entre gotas sucesivas. Pero con mucha frecuencia, las gotas se situaban en una espiral, separadas por ángulos de divergencia muy próximos a 137,5 grados."

"¡El ángulo áureo!", exclamó Abel súbitamente.

"Douady y Couder produjeron resultados similares a partir de cálculos computarizados. En detalle, descubrieron que el ángulo de divergencia depende del tiempo transcurrido entre gotas, obedeciendo a una complicada pauta de ramificación de curvas serpeantes. Cada sección de una curva comprendida entre serpeos adyacentes corresponde a un par concreto de números de familias espirales. La rama principal corre cerca de un ángulo de divergencia de 137,5 grados, y a lo largo de ella se encuentran todos los pares posibles de números de Fibonacci consecutivos, en secuencia numérica. Los huecos entre ramas representan 'bifurcaciones', en las cuales la dinámica experimenta cambios importantes."

Abel estuvo reflexionando unos momentos. "Pero también hay ramas que no se aproximan a 137,5 grados."

"Sí. La principal corresponde a la serie anómala. La temporización adecuada en este mismo modelo produce las excepciones más comunes a la regla de Fibonacci y la propia regla de Fibonacci —lo que muestra por qué se producen las excepciones, al tiempo que dejan claro que no se trata en absoluto de excepciones. Aunque, obviamente, nadie sugiere que la botánica raye la perfección de este modelo. En muchas plantas, el ritmo de aparición de los primordios puede acelerarse o ralentizarse. De hecho, con frecuencia tales variaciones van acompañadas de la conversión del primordio en hoja o en pétalo."

"¿Puede ser entonces que los genes de la planta afecten el momento de la aparición de los primordios?", preguntó Abel.

"Exactamente. Pero los genes no necesitan decirles cuál debe ser la separación entre primordios; de eso se encarga la dinámica. Es una asociación de física y genética."

Abel hizo ondear por el aire una flor de girasol especialmente bien desarrollada. "¿Crees que si me comiera estas semillas mejoraría mi capacidad para las matemáticas?"

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ALGORITHMIC BEAUTY OF PLANTS. Przemyslaw Prusinkiewicz y Aristid Lindenmayer. Springer-Verlag, 1990.

PHYLLOTAXIS AS A SELF-ORGANIZED GROWTH PROCESS. Stéphane Douady e Yves Couder en *Growth Patterns in Physical Sciences and Biology*. Compilación de Juan M. García-Ruiz et al. Plenum Press, 1993.

Libros

Ramón Pascual, Marià Alemany, Luis Alonso y Ramón Margalef

Mecánica cuántica

Teoría y experimento

QUANTUM MECHANICS AND EXPERIENCE por David Z Albert. Harvard University Press; Cambridge, 1994.

Si bien el número de libros de mecánica cuántica (MC) es muy elevado, como corresponde a una materia de fundamental importancia que desde su inicio ha revolucionado toda la física y buena parte del resto de la ciencia, el libro que comentamos escapa de lo normal. La mayoría de los textos se limitan a la exposición más o menos acertada de la MC que podríamos llamar "instrumental", la que van a usar los físicos en su vida profesional. Tales exposiciones se basan en la "interpretación de Copenhague", la que surgió en torno a Bohr y en la que los procesos de medida producen el "colapso" de las funciones de onda, el "maldito salto cuántico" que ya aborrecía Schrödinger a causa de su carácter impredictible y no determinista.

Durante los últimos decenios ésta era la teoría imperante. Pese a su carácter no determinista, permitía una explicación coherente de todos los fenómenos (hasta grados de precisión considerables), sin que ningún experimento de su campo de aplicabilidad quedara sin interpretar. Además de Schrödinger, una de las grandes figuras que combatieron la interpretación ortodoxa fue Einstein. Los manuales ni siquiera solían citar la famosa paradoja de Einstein, Podolski y Rosen (EPR) de 1934. Las teorías que mantenían la incompletitud de la MC mediante, por ejemplo, la introducción de variables ocultas, eran defendidas sólo por algunos, de Broglie entre ellos y, sobre todo, David Bohm. Aunque la demostración, por von Neumann, de la imposibilidad de tales variables quedara invalidada por la construcción explícita de dicha teoría, la idea general era que no había que preocuparse en buscar alternativas más complejas a la teoría aceptada, toda vez que no podrían distinguirse experimentalmente de la teoría ortodoxa.

A raíz de la demostración de Bell de la viabilidad de experimentos en los que la MC podría distinguirse de cualquier teoría "realista local", el interés por el tema resurgió. Experimentalmente se ha comprobado, mediante las desigualdades de Bell, que la naturaleza opta por la MC, pero la búsqueda de teorías alternativas en las que no quepa el colapso de la función de ondas, sino que las leyes de la naturaleza sean completamente deterministas, no cesa, al menos entre grupos (cada vez menos) minoritarios.



Erwin Schrödinger (1887-1961)

El libro de Albert es, de los que conozco, el que de manera más completa e inteligible aborda el problema. No es un manual para aprender MC: por ejemplo, no recoge la ecuación de Schrödinger (y la constante de Planck que debería aparecer en la fórmula [2.24] no lo hace quizá por dificultades tipográficas de la "h barrada"). Pero sí que es un texto al que se puede acercar quien ya sepa MC o cualquier persona interesada, pues el aparato matemático que usa se expone con claridad en el capítulo 2. En este capítulo, y en todos, el autor va exponiendo los argumentos de manera aparentemente repetitiva, pero aumentando progresivamente la complejidad.

Las bases experimentales de la MC, incluido el experimento de los agujeros de Young, se ofrecen en el capítulo 1 y los postulados de la interpretación ortodoxa, incluido el colapso, en el 2. El capítulo 3 está dedicado a comprobar, partiendo de la paradoja de EPR y siguiendo el posterior trabajo de Bell, que cualquier teoría física del universo habrá de ser no local. Consagra el cuarto al problema de la medida y a poner de manifiesto que el colapso de la función de ondas es incompatible con la evolución dinámica (y determinista) del sistema. El intento de buscar extensiones de la MC que, manteniendo su grado de predictibilidad, evite un colapso no incluido en la dinámica marcada por la ecuación de Schrödinger es el objeto del resto del libro.

El capítulo 5 analiza en profundidad la idea del colapso. ¿Cuándo y dónde tiene lugar? ¿Cómo se puede distinguir experimentalmente entre las diversas posibilidades? Después de comprobar que se trata de cuestiones que no se pueden resolver por vía empírica, esboza una posible teoría del colapso compatible con la dinámica basada en el trabajo de Ghirardi, Rimini y Weber para convencernos de lo inviable de la misma. El capítulo 6 expone la teoría de los "muchos mundos", de Everett, de la que Albert hace una

peculiar interpretación. A pesar de que la presenta como algo plausible, sobre todo en la versión de las "muchas mentes", un posterior razonamiento muestra sus dificultades.

Finalmente, el capítulo 7 describe las líneas fundamentales de la teoría determinista y no local de Bohm en la que, a pesar de que la función de ondas permite, mediante un determinado algoritmo, calcular las velocidades y todas las otras características de las partículas, predice unos resultados que coinciden con los de la MC. En una de las extensas y numerosas notas a pie de página, que pueden evitarse en una primera lectura (como también conviene a veces saltar algunos de los extensos paréntesis que dificultan una primera comprensión del texto), señala, por ejemplo, la inexistencia de una extensión relativista de la teoría. Incluso apunta los problemas de la teoría de Bohm y compara sus contenidos empíricos con los de la teoría de los muchos mundos. El último capítulo expone el problema de la automedida y acaba considerando la posibilidad de un "libre albedrío" en una teoría completamente determinista. (R. P.)

Bioquímica

Familias enzimáticas

THE GTPase SUPERFAMILY. Dirigido por Joan Marsh y Jamie Goode. Ciba Foundation Symposium. John Wiley & Sons, Chichester, 1993.

Los simposios que celebra periódicamente la Ciba Foundation suelen reunir un grupo reducido pero importante de expertos en campos muy específicos de la ciencia actual. *The GTPase superfamily* es un claro ejemplo de este buen hacer que sirve para fijar en el tiempo, mediante un texto muy bien presentado, lo último de nuestros conocimientos sobre un determinado tema. El libro está estructurado en capítulos independientes, cuyos autores abordan temas específicos con una estructura discursiva a medio camino entre la ponencia y el artículo de revisión.

El cuerpo lo forman una serie de contribuciones aisladas; se complementa con una sobria y cuidada presentación. Cada artículo ofrece la bibliografía que permite el posterior seguimiento del hilo descriptivo sin problemas. Lo mejor de este planteamiento es la transcripción de una activa discusión sobre el propio artículo, una discusión generalizada en la que los otros participantes del simposio destacan aspectos concretos, los cuestionan y aportan información. El elevado nivel de este tipo de discusiones no resta atractivo ni espontaneidad al planteamiento, de modo que el lector puede hacerse una idea cabal sobre la regulación de procesos por los sistemas que incluyen al GTP/GDP.

Bajo el epígrafe Discusión General se cobijan dos temas que carecen de presentación previa y el debate es mínimo. Pero el libro aporta también un apartado de discusión general, algo más amplio y generalizado, y un resumen a cargo de McCormick, autor de una excelente introducción. Entre ambos extremos, el libro plantea casi tantos interrogantes como contesta. Sirve para hacerse una idea general de la regulación metabólica a nivel de las proteínas con actividad GTPasa y modulación por nucleótidos y su ubicua distribución en sistemas muy diversos de control bioquímico y fisiológico.

Encontramos, asimismo, breves monografías sobre estructura y función de las GTPasas, su implicación en los procesos de control de la transformación celular, translocación de proteínas y otros fenómenos relacionados con el cruce de membranas, como la exocitosis, la endocitosis y la distribución y reorganización intracelulares de proteínas. Se trata también de las interacciones entre las GTPasas y los sistemas polímeros intracelulares de tubulina, dinamina y otros procesos de señalización y control celular. Se establece la participación de GTPasas en los efectos antivíricos del interferón, la implicación de proteínas controladas por guanín-nucleótidos en el mecanismo de acción de la fosfolipasa C y en procesos fisiológicos regulados por calcio y de diferenciación celular. Se concede bastante extensión a la genética y biología molecular de los genes *ras* que codifican la síntesis de estas proteínas G.

En conjunto, aporta una panorámica de las proteínas G y de los genes que las codifican en la regulación de procesos muy diversos en los que existe un substrato común de mecanismo de acción e implicación de los mismos nucleótidos. No es un libro completo, pues faltan bastantes sistemas de regulación por GTPasas de trascendencia reguladora, como es el caso del sistema de la proteína desacopladora de mitocondrias de tejido adiposo marrón, pero tampoco pretende serlo. Constituye un texto destinado a especialistas que promete convertirse en un obligada referencia. En este sentido es un libro sólido e interesante. (M. A.)

Fuentes

Depuradas

ANAXIMENES AUS MILET. Edición crítica preparada por Georg Wöhrle. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1993. **PHILOLAUS OF CROTON**. Edición crítica preparada por Carl A. Huffman. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

GALEN: ON SEMEN. Edición crítica preparada por Phillip de Lacy. Akademie Verlag GmbH; Berlín, 1992. **GALEN: ON THE THERAPEUTIC METHOD**. Traducción, introducción y comentarios de R. J. Hankinson. Oxford University Press; Oxford, 1991.

ARISTARCH VON SAMOS: UNTERSUCHUNGEN ZUR ÜBERLIEFERUNGSGESCHICHTE DER SCHRIFT *PERI MEGETHON KAI APOSTEMATON HELIOU KAI SELENES*, por Beate Noack. Dr. Ludwig Reichert Verlag; Wiesbaden, 1992. **HYGINUS: DE ASTRONOMIA**. Edición crítica preparada por Ghislaine Viré; Teubner; Stuttgart, 1992.

Entre las tareas más nobles en el empeño de rescatar el pasado de la ciencia destaca la presentación de textos depurados, las llamadas ediciones críticas. Existen colecciones eméritas, algunas de las cuales remontan su origen al siglo pasado. Hemos seleccionado aquí una muestra representativa de tres campos: teoría física, biomedicina y astronomía.

Los manuales hablan del corte epistemológico entre el mito y la ciencia al introducir las doctrinas de los presocráticos. Pero no fue un hiato brusco. Pierden eficacia los argumentos demiúrgicos, sin que desaparezca del todo el panteón griego, que convive con la explicación natural de los fenómenos. Esta arraiga cada vez más y cristaliza, por ejemplo, en el caso del arco iris, entendido ahora como una interacción entre los rayos solares y las nubes que se oponen a su paso.

Repiten también los manuales que Tales puso en el agua el principio de todas las cosas (*arkhé*), Anaximandro en lo ilimitado (*apeiron*) y Anaxímenes en el aire. De esa tríada milesia con la que comenzó la ciencia en Europa, el último fue también el más joven (*fl.* en torno al 545 a. C.). Se han perdido sus escritos, que pervivieron hasta el período helenístico, y lo que nos ha llegado, en estado fragmentario, son testimonios aducidos por otros autores. Georg Wöhrle los ha reunido, traducido y comentado en *Anaximenes aus Milet. Die Frag-*

mente zu seiner Lehre. ¿Cuáles eran sus enseñanzas?

Por *aire*, principio primordial en movimiento incesante, Anaxímenes de Mileto entiende el hálito o vapor que da aliento al cosmos. Todo procede del aire infinito y todo vuelve a él. De ese protoelemento derivan mundos, meteoros y seres orgánicos e inorgánicos. Distingue dos clases de fuerzas: la de condensación y la de dilatación o rarefacción. La primera provoca el enfriamiento; la segunda fuerza, el calentamiento. De la rarefacción del aire nace el fuego; de su condensación brotan los demás elementos, los meteoros y las piedras. La Tierra, una tabla según atribuye Aecio a Anaxímenes o disco plano rodeado por agua, flota sobre la atmósfera y constituye el centro, a cuyo alrededor giran el Sol y los planetas.

La tesis de Carl A. Huffman en su *Philolaus of Croton* se explicita en el subtítulo, *Pythagorean and Presocratic*. Es el primer trabajo comprehensivo desde los últimos 200 años de lo que queda de los escritos de Filolao de Crotona (c. 470-385 a.C.) Los fragmentos, imprescindibles para conocer la filosofía y la ciencia pitagóricas, muestran estrechos vínculos con la corriente principal del pensamiento presocrático. Filolao es contemporáneo de Hipócrates de Chios y de Teodoro de Cirene, dos pioneros de la matemática griega, el primero de los cuales pudo ser autor de unos *Elementos*. Viven por entonces Oenopides de Chios, descubridor del ángulo de oblicuidad de la eclíptica, así como Euctemon y Metón de Atenas. La teoría médica estaba, por su lado, avanzando a grandes pasos, con Hipócrates de Cos y la aparición de diversos tratados del corpus hipocrático.

La tradición divide a los pitagóricos entre *mathematici* y *acusmatici*. Aquéllos, consagrados al estudio de la matemática, rechazan que todo conocimiento venga de Pitágoras; éstos defienden a ultranza las reglas, morales sobre todo, del maestro de Samos. El matemático Filolao no abandonó el modo de vida pitagórico. Su obra comienza con el establecimiento de una tesis central: "La naturaleza en el orden del mundo se conforma de cosas que son ilimitadas y de cosas que son limitantes. Sin aclarar qué entiende por limitantes y por ilimitados, da algunas pistas: no son números, tampoco son principios abstractos separados del mundo sino manifestaciones del mundo, y utiliza siempre esos términos en plural. Todo lo que podemos decir legítimamente sobre la realidad última es que ésta debe incorporar las condiciones mínimas necesarias para que el mundo que conocemos emerja. Por tanto, especificar un conjunto de elementos tales como tierra, aire, fuego o agua trasciende lo que está justificado suponer sobre la realidad. La naturaleza (*physis*), el orden del mundo (*kosmos*) y *harmonia* son términos cardinales en la corriente presocrática.

Limitantes e ilimitados, auténticos pares naturales, no deben identificarse con formas y materias. Lo ilimitado define un continuo sin fronteras, mientras que los limitadores establecen lindes en su *continuum*. Para constituir el orden del mundo, estos principios, disímiles, requieren un tercero, la *armonía*, o el ajuste entre los dos antagónicos. Este tercer factor se halla estrechamente ligado a la noción de número. No creía que todas las cosas fueran números, como generalizaba Aristóteles a propósito de los pitagóricos, sino que las cosas se conocen a través del número; entendemos las cosas cuando percibimos su estructura y las relaciones o proporciones entre sus partes. En cada área de investigación trata de determinar el número mínimo de "principios explicativos" (*arkhai*) que debe suponerse que existen (o preexisten, *hyparkhein*).

Filolao divide el cuerpo humano en cuatro regiones, vinculadas a su vez a un conjunto distinto de facultades. La cabeza es la sede de la inteligencia, el corazón la sede de la vida y de la sensación, el ombligo la sede de la radicación y del primer desarrollo y los genitales son la sede de la generación. Los órganos de estas cuatro regiones jerarquizan el reino viviente.

Basado en la observación propia, Galeno se opuso en muchos puntos a la embriología recibida de Aristóteles. "Me he fijado en yeguas, canes, acémilas, vacas, cabras y ovejas para averiguar si retenían o no el semen de la copulación.... y he llevado a cabo un experimento doble, uno con los animales que eliminaban el semen y otros con los que lo retenían", escribía en el *Peri spermatos*, cuyo texto, establecido, traducido y comentado por Phillip de Lacy, ha encontrado amparo en el "Corpus Medicorum Graecorum". De acuerdo con los cánones, tras rastrear las fuentes manuscritas, dos códices griegos (uno de la biblioteca del Patriarcado de Moscú y el otro de la Nacional de París), de Lacy examina las versiones latinas y árabes y esboza, al fin, el "stemma", es decir, el árbol genealógico de la transmisión de la obra a lo largo de los siglos.

Pero el futuro investigador que se acerque por vez primera a Galeno debiera comenzar por el volumen que para él (sin decepcionar a los expertos) ha preparado R. J. Hankinson en su presentación del *On the Therapeutic Method.* Hankinson no da nada por sabido. Así, relata la vida del autor, que el año 129 nació en Pérgamo y murió octogenario. De su padre Nicón, un arquitecto acaudelado, aprendió aritmética, lógica y gramática. Le despertó el interés por la filosofía, que estudió en Pérgamo y Esmirna con maestros platónicos, peripatéticos y estoicos. No menos universal fue su formación médica, que completó en Alejandría. Nadie será buen médico, dirá más tarde, si no está versado en lógica, física y ética. En 192 se convirtió en médico del emperador Septimio Severo.

Con pedagógica claridad, Hankinson pone al principio un sucinto glosario de voces griegas significativas, traduce el texto original con soltura legible sin traicionarlo y se detiene en la identificación de personajes (Tesalo, Erasístrato), en la descripción de temas galénicos (dialéctica, ética médica) y en el análisis de expresiones de especial interés (*methodos*, *tekhnai*).

De Methodo Medendi refleja el talante crítico de Galeno ante las escuelas dominantes y teorías recibidas. Ello no le impide reconocer el magisterio de Platón, "el mayor entre los antiguos", o atacar a Crisipo, pese a su profunda deuda con los estoicos. Sus conceptos científicos, sin embargo, están más cercanos a Aristóteles. A propósito de la naturaleza y estructura de la relación causal, incorpora elementos de la teoría aristotélica sobre las cuatro causas, de Platón toma la identificación entre la causa final y el demiurgo creador, y de los estoicos se queda con las categorías de antecedente y precedente. Ve en la geometría el modelo de ciencia cierta y autoevidente, por un lado, y de enorme utilidad práctica, por otro. Pero el conocimiento dista mucho de ser una empresa *a priori*. Nuestros sentidos operan como "criterios naturales" del conocimiento, aunque deben ejercitarse y refinarse. Funda esa opinión en la observación de los animales, que necesitan algún tipo de fiabilidad perceptiva para hacerse con el mundo que les rodea.

En medicina se proclama alumno distante de Hipócrates. Había entonces tres sectas principales: la empirista, la metodista y la dogmática. (Desprecia a los metodistas, sofistas incapaces de descubrir la enfermedad y la terapia, a quienes les bastaba un

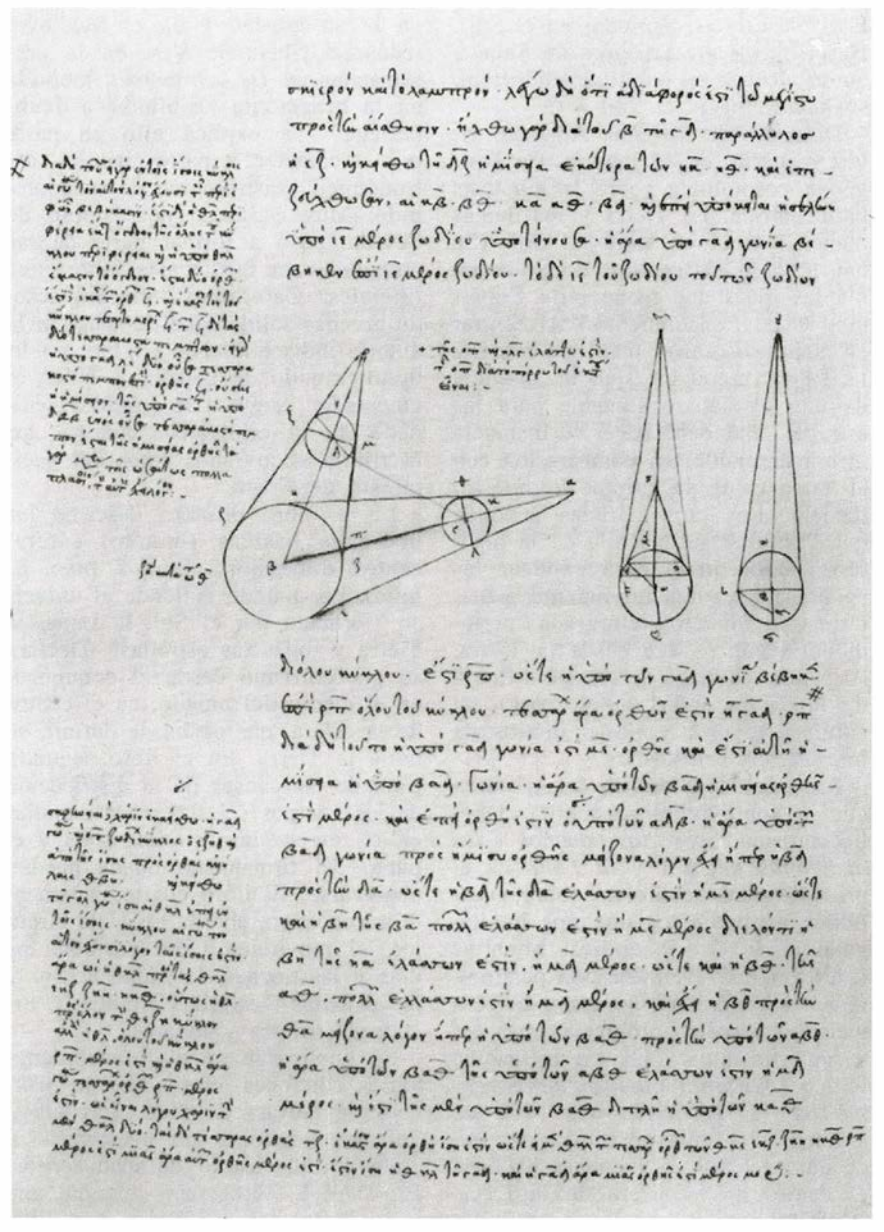
par de meses para dominar el saber médico.) Se distinguen los empiristas por construir, sobre los fundamentos de un número infinito de casos, las relaciones generales que vinculan unos hechos con otros; someten al crisol de la experiencia una hipótesis sugerida por el azar, la intuición o la comparación analógica. Por contra, los dogmáticos sostenían que no bastaba la experiencia: el médico debe llegar al conocimiento de la estructura subyacente del cuerpo y de la naturaleza de las condiciones patológicas. El médico dogmático extrae la terapia de la inferencia desde signos y síntomas, que son manifiestos, hasta las condiciones internas del cuerpo del paciente, que no son manifiestas. Este procedimiento se conoce como *analogismos*, o inferencia a partir de indicaciones (*endeixeis*). Galeno abraza la concepción teórica de la medicina, pero no se muestra hostil contra el empirismo; la *peira*, la comprobación experimental, constituye un componente necesario de la justificación de una teoría médica.

Dedicados estos dos primeros libros a cuestiones introductorias, los doce restantes que componen el *De Methodo Medendi* se ocupan de las enfermedades, primero en general y luego en especial. A lo largo de los nueve capítulos en que se articula el libro primero, describe la situación de la medicina en su tiempo. El verdadero método terapéutico es el que discierne las especies mórbidas por diferencias adecuadas, evitando el verbalismo estéril. La terapéutica consiste en restablecer el orden natural roto por la enfermedad, lo que exige dominar la anatomía y la función. Importa, en definitiva, alcanzar la estructura categórica que subyace bajo la salud y la enfermedad. En el libro segundo recuerda los tipos de cosas contrarias a la naturaleza e introduce un concepto al que le concede interés cardinal, el de disposición; el número de enfermedades depende del número de disposiciones.

El *De semine* consta de dos partes, con un apéndice sobre las glándulas de la reproducción. El libro primero se extiende en el semen masculino y el segundo sobre el semen femenino. ¿Cuál es la causa de las diferencias entre los órganos sexuales del macho y de la hembra? Existe una correspondencia simétrica en los dos conjuntos de órganos; cada parte de los genitalia masculinos tiene su contrapartida en la hembra, y cada parte de los genitalia femeninos tiene su contrapartida en los masculinos. Las partes difieren sólo en tamaño y posición.

Compara el desarrollo del feto con la germinación de la planta desde la diferenciación de las membranas, para proseguir por la formación del diafragma, el pericardio, meninges y la piel. Todas las partes del cuerpo extraen su nutrimento de la sangre, pero la asimilación del mismo en las partes nacidas de la sangre es mucho más rápida que la asimilación en las partes engendradas a partir del semen, porque en este último caso la sangre debe convertirse en un fluido semejante al semen antes de que pueda asimilarse como nutrimento. Los testículos generan el semen más puro, cuya calidad, cuando se transmite a todas las partes del cuerpo, causa la masculinidad en los machos y la feminidad en las hembras. Los testículos reciben también el semen generado en venas y arterias espermáticas y lo envían a los conductos espermáticos.

La obra de Beate Noack *Aristarch von Samos: Untersuchungen zur Überlieferungsgeschichte der Schrift* Peri megethon kai apostematon heliou kai selenes ("Sobre los tamaños y las distancias del Sol y la Luna") parece imprescindible en las bibliotecas univesitarias. Es texto académico en el sentido más restrictivo del término, donde se pasa revista exhaustiva a la treintena de manuscritos, agrupados en seis familias, que existen del libro de Aristarco. Compendia la suerte de la recepción de la tesis heliocéntrica desde el de Samos hasta Copérnico. Se detiene en su influjo en la



Página del manuscrito, con sus escolios, de la obra de Aristarco Sobre los tamaños y las distancias del Sol y la Luna, *copiado por Johannes Mauromates en torno a 1548 y que se conserva en el Escorial*

cultura árabe (desde Qusta ibn Luqa en el siglo nono). Y llama la atención sobre el retraso en producirse la edición *princeps*, realizada por John Wallis en 1688. Noack cierra su trabajo con una edición, que titula de provisional, de los escolios del libro en griego y en alemán.

La astronomía griega estaba comprometida con la hipótesis geocéntrica. Pero Aristóteles no sólo defendía la verdad del geocentrismo, sino que daba también cuenta de la creencia de otros en un modelo alternativo en que la Tierra se movía con movimientos diurnos y anuales. Algunos pitagóricos y Heráclides de Ponto (350 a. C.) parece que habrían propuesto hipótesis epicíclicas (en las cuales los planetas, de manera singular, Venus y Mercurio, se mueven a lo largo de órbitas centradas en el Sol). Hasta que llegó Aristarco de Samos, quien alcanzó su plenitud intelectual, su *ackmé*, hacia el 280 a. C.

Discípulo de Estratón, Aristarco vivió y enseñó en Alejandría. Construyó su cosmología sobre la hipótesis heliocéntrica. La Tierra y los demás planetas giran en torno al Sol. (Se han perdido los escritos donde exponía las ideas que recuperaría Copérnico en el Renacimiento.) Al centrar en el Sol la órbita anual que recorría la Tierra, reconoció que la ausencia de una paralaje observable para las estrellas fijas debe hacer su distancia inconmensurable, en comparación con el tamaño de la órbita de nuestro planeta. Los comentaristas suponen que Aristarco se apoyaría en la hipótesis heliocéntrica para explicar las peculiaridades del movimiento planetario (movimientos retrógrados periódicos) según se ven desde la Tierra. Aristarco admitió la rotación diaria de la Tierra sobre su eje, para así explicar el orto y ocaso diarios de los cuerpos celestes.

La única obra escrita de Aristarco que ha sobrevivido no aborda el heliocentrismo. *Sobre los tamaños y las distancias del Sol y la Luna* es el primer tratado completo sobre cuestiones astronómicos que nos ha llegado de la Grecia clásica. Mientras la astronomía avanzaba con parsimoniosa lentitud, otra ciencia —la geometría— resolvió problemas difíciles y convirtió la disciplina en un sistema lógico. Aristarco procede *more geometrico*. A partir de una serie de axiomas (la Luna posee su luz procedente del Sol; la Tierra se halla en el centro de la esfera de la Luna, etcétera) establece, mediante una combinación de astronomía y geometría, un elenco de proposiciones, de las que suelen destacarse las siguientes: las distancias relativas entre el Sol y la Luna desde la Tierra están en una razón inferior de 20:1, aunque mayor que 18:1; los diámetros del Sol y la Tierra se hallan en una razón inferior a 43:6, aunque mayor que 19:3 (proposición 15); los diámetros de la Tierra y la Luna están en una razón inferior a 60:19, aunque mayor que 108:43 (proposición 17). Reviste especial interés su razonamiento geométrico en un tiempo en que no se habían establecido todavía los métodos trigonométricos de una manera sistemática (según parece, el sistema trigonométrico expuesto por Ptolomeo en el *Almagesto* se remonta a Hiparco de Rodas, 150 a. C.).

Sorprende la escasa atención que los investigadores han prestado a Higino, uno de los autores más citados en la antigüedad y en el Medievo, reconoce Ghislaine Viré en la presentación del *De astronomia*, incluida en la benemérita "Bibliotheca Teubneriana". Se explica ello en parte por el carácter, a partes iguales, astronómico y astrológico de su contenido. Muy estimado por Isidoro de Sevilla, pasó a formar parte de las compilaciones medievales sobre artes liberales. Carecemos, sin embargo, de pruebas sólidas que demuestren la autoría indiscutible de Higino, un liberto oriundo de España, a quien el emperador Augusto le confió el cuidado de la biblioteca palatina. Lo escribiría pocos años antes del nacimiento de Cristo.

En el libro primero describe las nociones básicas (mundo, esfera, centro, dimensión, círculos, polo, límite). Por mundo entiende el universo "formado por el Sol, la Luna, la Tierra y todas las estrellas". Declara su geocentrismo desde el comienzo: en el medio del mundo, en el centro de la esfera, que acaba de definir, se halla la Tierra. En el libro segundo trata de las causas de la distribución de los cuerpos celestes, para estudiar en el tercero las estrellas fijas y el punto del firmamento donde pueden observarse. El libro cuarto, netamente astronómico, aborda los siete círculos, el movimiento del cosmos, los días y las noches, la Luna, el Sol y los planetas ("estrellas errantes"), los eclipses solares y lunares.

Se publicaron en el Renacimiento varias ediciones, entre ellas la *princeps* de Ferrara en 1475. Las subsiguientes ediciones no agotaron, sin embargo, el rastreo de manuscritos. En 1967 L. Fitzgerald defendía una tesis en la Universidad de San Luis en la que colacionaba 28 códices desde el siglo nono hasta el doce agrupados en tres familias, pero no recogía todos los códices de ese intervalo temporal. Viré ha manejado hasta ochenta manuscritos, de las que la mitad son posteriores al siglo XII. (L. A.)

Ecología

Holística

AN ENTANGLED BANK. THE ORIGINS OF ECOSYSTEM ECOLOGY, por Joel B. Hagen. Rutgers University Press; New Brunswick, 1992.

Este libro pertenece a la clase de los que, a través de una presentación histórica simplificada y amena, sirven de introducción a una rama de la ciencia, en este caso la ecología. Conforme a su título, se centra sobre comunidades o ecosistemas; no se restringe, pues, a la demografía o a los sistemas teóricos formados por depredador y presa y los problemas de la competencia, los temas más comentados en obras comparables. Y tampoco muestra excesiva preocupación por los modelos matemáticos o la estadística. Se refiere principalmente a ecólogos que adoptaron un punto de vista "holístico", un adjetivo no muy afortunado, pero con el que, según parece, no queda más remedio que vivir. Se justifica, cómo no, en lo referente a Darwin y a su frase "An entangled bank" que encabeza un párrafo en el que, por unos momentos y sin dejar de lado su preocupación por el origen de las formas vivas, expresa su admiración ante las múltiples relaciones que se establecen entre unos y otros seres vivos, cuyo resultado es un complicado sistema que funciona y, podríamos añadir, constituye el escenario real de la evolución y quizá su mecanismo fundamental.

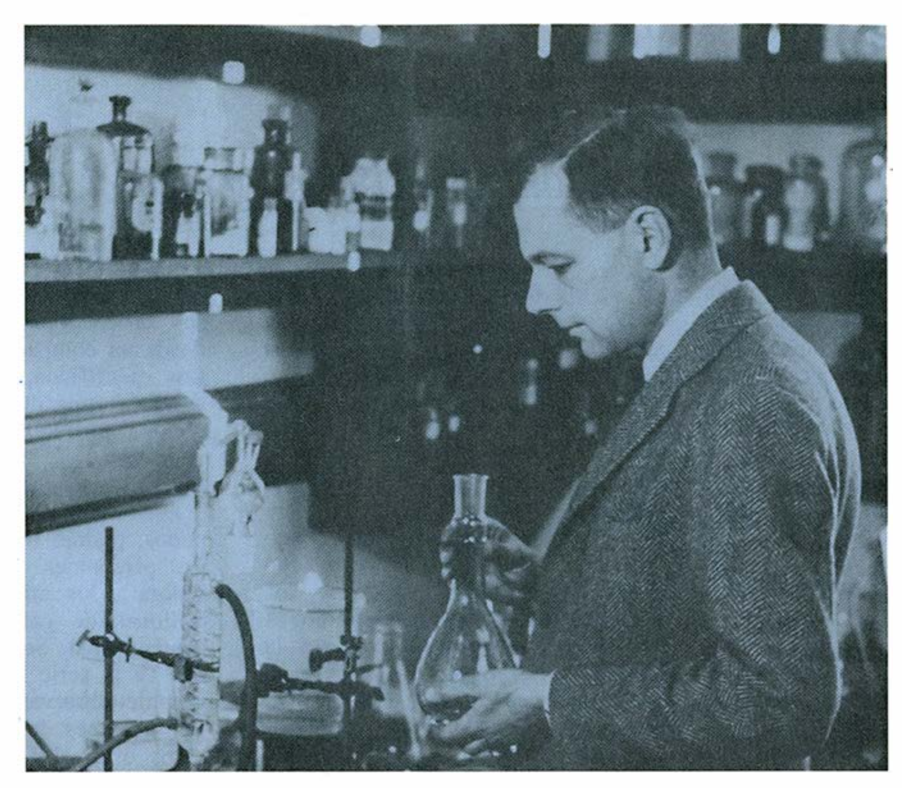
El texto comenta y sitúa las circunstancias, los puntos de vista y las actitudes de algunos ecólogos notables y delinea su contribución a la ciencia; entre ellos, Lindeman y Hutchinson, los hermanos Odum, etcétera, presentados como un si es no es heréticos en la versión de la ciencia ecológica que ahora priva. Por tanto, este libro puede diferir de interpretaciones habituales acerca de los contenidos y deberes de la ecología. Este conflicto, latente o explícito, no es nuevo, puesto que nació con el nombre de la ecología. Haeckel, que la bautizó, tenía una visión analítica o monoespecífica de la ecología, cuya misión sería reconocer la modalidad de la vida de cada especie e interpretar en relación con ella su

evolución, por la interacción entre función y forma. Entre tanto, su contemporáneo, compatriota y contrincante Victor Hensen, pretendía llegar a entender el funcionamiento global de los sistemas naturales —comenzando por la bahía de Kiel. Esta visión dual de las funciones y límites de la ecología ha persistido. Quizá la larga gestación del llamado neodarwinismo fuera más propicia a la manifestación de la tendencia haeckeliana que a la henseniana.

Por supuesto, semejantes disquisiciones no aparecen en este libro, que si tiene algún defecto mayor es el de ignorar el carácter universal de la ciencia y ceñirse al espacio anglosajón y a la época entre guerras. Olvida la Europa continental y, por tanto, a ecólogos como Braun-Blanquet, Thienemann —a éste lo menciona brevemente como cointroductor con Elton del concepto de niveles tróficos—, Sukachev, y tantos otros iniciadores de una ecología sistémica.

La aparente armonía de la naturaleza, según el modelo del ribazo pletórico de enmarañada vitalidad, que Darwin ofreciera, se fundamenta en las relaciones de tipo básicamente fisiológico entre unos y otros organismos, a través de su entorno común. Este tema se inicia centrándolo en la figura de F. E. Clements, para quien la ecología era una fisiología de campo y la aplicó a entender y describir las comunidades vegetales de parte de Norteamérica, interesándose principalmente por las secuencias históricas o sucesiones que resultan de la interacción progresiva entre la vida de las plantas y las propiedades que ofrece el ambiente. La duna es para Clements lo que fue el lago para Forbes y el seto intricado para Darwin, aunque visto con una actitud ligeramente diferente, a través del juego entre competencia y sucesión, que genera las condiciones cambiantes y conducentes a nuevos estados de equilibrio transitorio.

Elton, formado en Oxford, y Hutchinson, en Cambridge, ambos activos en este siglo, sirven para comentar cadenas tróficas, nichos ecológicos, "equilibrios naturales" y aspectos del metabolismo global de las comunidades. Sistemas naturales sencillos, como los nórdicos, o bien simplificaciones mentales más o menos forzadas, abren ventanas para tratar de reconocer principios muy generales en el funcionamiento de la naturaleza. Dos capítulos se dedican a estas cuestiones, que nos llevan también a los peliagudos temas de la termodinámica, inicialmente suscitados por un malogrado discípulo de Hutchinson, Lindeman. En la misma sección se menciona la primera introducción de puntos de vista matemáticos y cibernéticos, con fugaz referencia a Volterra. También a la adopción de la voz ecosistema, propuesta por Tansley, a cuyas objeciones al holismo de Smuts y Phyllips se dedica buen espacio. Pero no se cuenta nada de la larga historia de otras unidades (biocenosis, biomas, etc.) propuestas y discutidas por otros autores ni del tratamiento de las fronteras.



G. Evelyn Hutchinson en el laboratorio Osborn Memorial, 1939

Los hermanos Odum (Eugene P. y Howard T.) reciben detenida atención, y se comprende que así sea dada la orientación del libro. Sus puntos de vista dan importancia a una unificación de la naturaleza, conseguida en buena parte a través del trabajo desarrollado por diversas formas de energía. La disponibilidad de la energía nuclear y el riesgo a ella asociado anticipaba mayor protagonismo y más suculentos apoyos a la ecología, que sólo parcialmente se hicieron realidad, desviándose por infinitos canales. De todas maneras han aparecido numerosas técnicas nuevas, como el uso de isótopos. Y, obviamente, ha quedado justificada la aproximación global al estudio de los ecosistemas, que ayudó a introducir enfoques útiles: así, la adopción de cuencas como la unidad más razonable para el estudio de ecosistemas terrestres (Bormann y Likens).

Se presenta como un conflicto el revuelo originado por un libro de Wynne-Edwards que sugería que la selección pudiera operar también sobre conjuntos de quizá más de una especie. Se señalan las posiciones de Lewontin a favor del reduccionismo, de Mayr, de los partidarios de la selección de grupo, Williams, Wilson. El capítulo 9 comenta el Programa Biológico Internacional, orientado al conocimiento de los grandes tipos de ecosistemas. Los objetivos —y especialmente los recursos destinados a tal fin— parecieron exagerados a los biólogos moleculares, para los cuales "cualquier organismo mayor que *Escherichia coli* sólo sirve para volverlo todo más confuso".

Pero en la práctica la biología molecular se ha llevado el gato al agua y la ecología, a pesar de todas las alharacas, se mantiene al nivel de proporcionar un seguimiento mínimo de la higiene del entorno, sin desarrollar demasiado su visión general, que contiene aspectos socialmente subversivos. En esta línea el epílogo del libro describe la unidad de la Tierra que la visión desde el espacio nos proporciona y aun su funcionamiento unificado popularizado por Lovelock con su teoría de Gaia. El libro se lee bien y expresa lo que un profesional inteligente capta de la historia de la ecología en estos últimos años. Pero seguramente no profundiza lo bastante para lo que tal vez necesiten los tiempos que corremos... (R. M.)

Ensayo

Anne Eisenberg

Los científicos y sus CD-ROM

Los discos compactos se nos han echado encima. Aunque algunos científicos tienen sus reservas, están comenzando a adquirir estos medios digitales, sea para avanzar en sus investigaciones, en sus negocios o incluso para echar algún que otro vistazo a las fotografías de la superficie de Marte que tomaron las misiones Viking de la NASA.

Estaba en el destino que las personas de mentalidad técnica y los discos compactos acabaran por descubrirse uno al otro, dada la atractiva combinación de lo práctico y lo grato que los discos ofrecen. Tal unión, empero, tuvo un arranque lento. En un principio, la técnica de los discos compactos se desarrolló para registros de audio. A mediados del decenio pasado habíase adaptado para la grabación densa de datos de otros tipos: un solo disco compacto contiene cientos de veces más datos que un disco flexible. (A diferencia de éstos, la memoria de los discos compactos es "de sólo lectura", lo que significa que una vez grabados los datos en ellos ya no es posible modificarlos.) A principios de 1994 estaban disponibles en soporte compacto alrededor de 8000 títulos, pero los atractivos para los científicos eran muy pocos.

Parte del problema consistía en la denominación "multimedios" utilizada como reclamo comercial para los discos compactos. "Multimedio" es un vocablo que los científicos propenden a asociar más con juegos como "Taxi Infernal" y "Tarot Virtual" que con el *Journal of the American Chemical Society* (*JACS*), pongamos por caso. (En la jerga, la denominación "multimedios" se le da a ciertos programas para ordenador personal que cuentan con animación, sonido, texto, gráficos y fragmentos de vídeo. La baja calidad de los primeros productos llevó a los cínicos a tildarlos de ejemplos de "multimediocridad".) Por si el término "multimedios" no resultase suficientemente sospechoso, pronto tuvo un compañero comercial, "hipermedios" —de hipertexto—, en el cual el usuario señala una palabra con el ratón y al accionar el pulsador recibe más información sobre el tema. Para conseguir el efecto de estratificación de los hipermedios, el usuario señala palabras, sonidos o imágenes de enlace.

Muchos discos compactos multimedios fueron concebidos para quienes, en palabras de un patrocinador, "querían más que letra impresa." Los científicos no parecían nada proclives a ingresar en tal grupo. Pero hacia el otoño de 1994, el respetabilísimo *JACS* podía obtenerse en disco compacto, perfectamente compuesto y sin faltar fórmulas, ecuaciones e ilustraciones a todo color. Se incorporó a una miríada de libros y revistas en la cual los multimedios resultaron ser más que elementos decorativos.

A finales de 1994 eran muchos los científicos que insensibles a la seductora capacidad de los CD-ROM para producir imágenes y sonidos, habían llegado a estimar su prodigiosa capacidad para el almacenamiento de datos. Los discos proporcionaron especial alivio a aquellos investigadores obligados a enfrentarse a estanterías repletas de revistas (10 años de *JACS* ocuparían en disco compacto unos pocos centímetros de estante) y también a quienes estaban a punto de verse expulsados de sus casas por ingentes colecciones de transparencias o discos flexibles. El nuevo soporte ha sido adoptado asimismo por los usuarios que se disponen a instalar nuevos sistemas operativos en sus ordenadores, tarea mucho más sencilla de efectuar desde un compacto que desde docenas de discos flexibles. Los científicos, por pura conveniencia, se han sumado a las huestes de quienes actualizan sus ordenadores mediante "paquetes multimedios", que cuentan con un lector de discos, una tarjeta de sonido de 16 bits y un juego de altavoces a caballo sobre la pantalla del ordenador.

Este año, los astrónomos, sean profesionales o aficionados, podrán insertar discos compactos en sus ordenadores personales y observar, a gran distancia del monte Palomar, los miles de millones de estrellas y los varios millones de galaxias del cielo nocturno del hemisferio septentrional. Se podrán observar las versiones digitalizadas de la serie *Sky Survey*, preparadas por National Geographic-Observatorio Palomar. Se dice que la calidad de las imágenes de los discos las hace indistinguibles de los datos originales. Los estudiosos de las estructuras galácticas y de los cúmulos de galaxias, cuyas investigaciones se han visto limitadas hasta ahora a regiones celestes relativamente pequeñas, confían en que este conjunto de datos, ingente y unificado, modifique no sólo su modo de enfocar los problemas astronómicos, sino también las cuestiones concretas que formulan.

Los discos compactos, amén de resultar atractivos a los investigadores, satisfacen la necesidad de muchas personas que buscan soluciones eficientes a una plétora de problemas técnicos. Por ejemplo, cuando las cartas náuticas estén disponibles a bajo costo en discos compactos, los marinos de fin de semana descenderán al sollado, insertarán los discos correspondientes en sus ordenadores portátiles y conectarán a éstos un sistema de posicionamiento global, que les proporcionará la longitud y latitud. El programa se encargará de mantener centrado al barco sobre la carta, presentada en color en la pantalla. Abolidos quedarán cronómetros, sextantes, brújulas y toda la serie de cartas, escurridizas y fastidiosas.

Muchos de los científicos que han empezado a utilizar compactos para informarse han resuelto elegantemente el enfrentamiento entre discos y libros, utilizando ambos: el disco, para búsquedas en pantalla; el libro después, cómodamente instalados en su butaca. Esta técnica doble funciona bien en situaciones muy diversas; por ejemplo, se usa la enciclopedia médica familiar que venga en compacto, para buscar el nombre de una determinada enfermedad; y, después, *The Lancet* para un examen más minucioso de lo que se está haciendo sobre ella en medicina.

Parece que los compactos han acabado por sacudirse la reputación de infantilismo que tenían entre los científicos, a buen número de los cuales podemos hoy ver frente a las pantallas de sus ordenadores. Observan y escuchan la partitura de *La consagración de la primavera* del compacto, al que piden de cuando en cuando una explicación técnica de un pasaje ("Aquí entran las trompas"). O desempolvan su francés valiéndose de un curso de autodidaxis, cuyo acento es perfecto. Muchos de ellos han llegado a la conclusión de que, a pesar de ciertos dislates, no pocos discos compactos están resultando verdaderamente ser lo que prometía el primer disco del curso de francés —*très charmants*.